

(19)



Europäisches Patentamt

European Patent Office

Office européen des brevets



(11)

EP 1 418 482 A1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:

12.05.2004 Patentblatt 2004/20(51) Int Cl.7: **G05F 1/67**(21) Anmeldenummer: **03023546.9**(22) Anmeldetag: **15.10.2003**

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR
HU IE IT LI LU MC NL PT RO SE SI SK TR**

Benannte Erstreckungsstaaten:

AL LT LV MK(30) Priorität: **17.10.2002 DE 10248447**(71) Anmelder: **Badische Stahl-Engineering GmbH
77694 Kehl (Auenheim) (DE)**

(72) Erfinder:

• **Danilov, Vladimir****77694 Kiel (DE)**• **Kimmer, Klaus****77731 Willstätt (DE)**(74) Vertreter: **Beetz & Partner Patentanwälte****Steinsdorfstrasse 10****80538 München (DE)**(54) **Verfahren und Vorrichtung zur MPP Regelung für Solarzellen**

(57) Die Erfindung betrifft Verfahren und Vorrichtungen zur Anpassung elektrischer Lasten an eine Stromquelle und gegebenenfalls wechselnder Stromquellen-Leistung, die es ermöglichen, der Stromquelle maximale Leistung zu entnehmen.

Die Vorrichtung (1) weist auf: eine Differenziereinrichtung (4), die ein Ausgangssignal (I_Q , U_Q) der Stromquelle (3) nach der Zeit (t) differenziert und ein der ersten Ableitung (dU_Q/dt , dI_Q/dt) oder der zweiten Ableitung (d^2U_Q/dt^2 , d^2I_Q/dt^2) entsprechendes Ausgangssignal liefert, und einen der Differenziereinrichtung (4) nachgeschalteten Verstärker (5), an dessen Ausgang

die Last (2) anliegt und der das Ausgangssignal der Differenziereinrichtung (4) verstärkt, wobei der Verstärker (5) derart mit der Stromquelle (3) verbunden ist, daß die vom Verstärker (5) aufgenommene Verstärker-Leistung (P_V) der Stromquelle (3) entnommen wird, und das Ausgangssignal (U_A , I_A) des Verstärkers (5) Schwingungen, insbesondere Resonanzschwingungen, aufweist.

Der Verstärkungsgrad (F) des Verstärkers (5) wird vorzugsweise über eine Einstelleinrichtung (8) mit einem Regler (9) so geregelt, daß unter Resonanzbedingungen maximale Leistung entnommen wird (MPP-Regler).

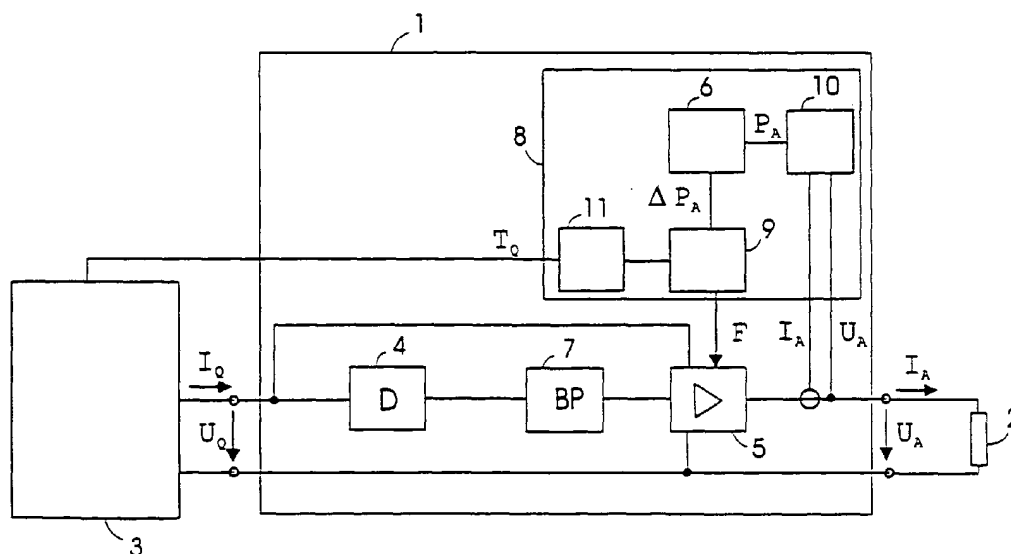


Fig. 4

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft Verfahren und Vorrichtungen zur Anpassung elektrischer Lasten an eine Stromquelle mit gegebenenfalls wechselnder Stromquellen-Leistung, die es ermöglichen, der Stromquelle maximale Last-Leistung über die Last zu entnehmen.

[0002] Photovoltaische Zellen (Solarzellen) wandeln einfallendes Sonnenlicht durch die Freisetzung von positiven und negativen Ladungsträgern in einem dotierten Halbleitermaterial in elektrische Energie. Während die an Solarzellen abgreifbare Spannung relativ unabhängig von der Lichteinstrahlung ist, besteht für die Stromstärke eine ausgeprägte Abhängigkeit des über eine Last entnehmbaren Stroms von der Intensität der einfallenden Lichtstrahlung.

[0003] Die Fig. 1 zeigt schematisch den Zusammenhang zwischen Strom und Spannung bei einer typischen Photovoltaikanlage (z.B. mit Siemens-Modulen SM 110) für zwei unterschiedliche Beleuchtungsstärken der Sonneneinstrahlung (100 % (1000 W/m²) und 50 % (500 W/m²)). In Abhängigkeit von dem Lastwiderstand R_L , mit dem die Solarzelle beschaltet ist, stellt sich für eine gegebene Beleuchtungsstärke ein Arbeitspunkt auf der Strom-Spannungskennlinie der Solarzelle ein. In Fig. 1 sind ferner die Kennlinien für Lastwiderstände R_L von 1,5 Ω , 2,8 Ω und von 3,3 Ω dargestellt. Für eine Sonneneinstrahlung von 100 % ergibt sich bei einem Lastwiderstand von 1,5 Ω ein Arbeitspunkt der Solarzelle bei ca. 10,5 V und ca. 6,9 A, also eine Leistung P_1 von etwa 72,5 W. Der Arbeitspunkt für die Sonneneinstrahlung von 100 % liegt andererseits für einen Lastwiderstand R_L von 2,8 Ω bei ca. 17,5 V und ca. 6,3 A und entspricht dem Leistungsoptimum (Maximum Power Point - MPP). Die dem Photovoltaiksystem bei diesem Arbeitspunkt entnehmbare maximale Leistung P_{MAX1} beträgt somit etwa 110 W.

[0004] Bei einer Sonneneinstrahlung von nur 50 % liegt der Arbeitspunkt des Systems für den Lastwiderstand R_L von 2,8 Ω bei ca. 9,0 V und ca. 3,3 A, woraus sich nur eine Leistung P_2 von etwa 30 W ergibt. Das Leistungsmaximum P_{MAX2} liegt für diese Kennlinie bei ca. 16,0 V und ca. 3,0 A und beträgt damit etwa 48 W. Hierfür wäre ein Lastwiderstand R_L von etwa 5,3 Ω erforderlich. In Fig. 2 sind die entsprechenden Leistungs-Kennlinien des betrachteten Photovoltaiksystems mit den Leistungsmaxima P_{MAX1} und P_{MAX2} in Abhängigkeit von der Solarzellenspannung schematisch dargestellt.

[0005] Man erkennt aus den Fig. 1 und 2 unmittelbar, daß durch Fehlanpassung des Lastwiderstands ein mehr oder weniger erheblicher Teil der für eine gegebene Sonneneinstrahlung zur Verfügung stehenden elektrischen Leistung nicht genutzt wird.

[0006] Um unter Praxisbedingungen die maximal mögliche Leistungsabgabe des Photovoltaiksystems durchgehend zu erzielen, ist folglich eine andauernde Anpassung des Lastwiderstands an die aktuelle Beleuchtungsstärke nötig. In dem in den Fig. 1 und 2 gezeigten Beispiel muß die Impedanz des Lastwiderstands für eine 50%ige Sonneneinstrahlung auf ca. 5,3 Ω erhöht werden, damit unter diesen Beleuchtungsbedingungen dem System maximale Leistung entnommen werden kann. In der Regel werden Solaranlagen jedoch für eine einzige Beleuchtungsstärke ausgelegt, so daß die Lastimpedanz für andere Beleuchtungsbedingungen nicht richtig angepaßt ist. Aufgrund dieser Fehlanpassung wird der Anlage die meiste Zeit über nicht die gesamte zur Verfügung stehende Leistung entnommen.

[0007] Außer von der Bestrahlungsstärke, die auf das Halbleitermaterial der Solarzelle trifft und die von der Bewölkung und der Verschmutzung der Zelloberfläche beeinflusst wird, hängt die Solarzellenkennlinie auch von der Zelltemperatur ab. Eine höhere Solarzellentemperatur führt zu einer niedrigeren Leistung und damit zu einem schlechteren Wirkungsgrad. Der Wirkungsgrad gibt an, wieviel der eingestrahnten Lichtmenge in nutzbare elektrische Energie umgewandelt wird. Kommerzielle Solarzellen haben je nach Zellentyp einen Wirkungsgrad von 8 bis 14 %.

[0008] Fig. 3 zeigt an einem Beispiel die Beleuchtungsstärke und ihre Schwankungen aufgrund von wechselnder Bewölkung im Verlauf eines Tages. Man kann deutlich die starken Schwankungen der Bestrahlungsstärke erkennen, die eine laufende Anpassung des Solarzellenarbeitspunktes erfordern, um der Solarzelle maximale Leistung entnehmen zu können.

[0009] Ein weiteres Problem beim Betrieb einer photovoltaischen Solaranlage kann durch wechselnde Verbraucherlasten entstehen. Insbesondere bei "Insellösungen", bei denen ein oder mehrere Verbraucher (z.B. Elektromotoren) direkt von einer Solaranlage betrieben werden, ändert sich bei einer wechselnden Last unmittelbar der Arbeitspunkt der Solaranlage. Auch beim direkten Laden eines Akkumulators beeinflusst der Akkumulatorinnenwiderstand, der vom Ladezustand abhängig ist, die von der Solarzelle erzeugte elektrische Leistung während des Ladevorgangs.

[0010] Um Solarzellen jeweils ihre aktuell maximal mögliche Leistung zu entnehmen und sie so optimal nutzen zu können, ist es bekannt, zwischen Solargenerator und Verbraucher eine Anpassungsvorrichtung zu schalten, welche die Impedanz des Verbrauchers adaptiv an den zeitlich wechselnden Innenwiderstand des Solargenerators anpaßt.

[0011] In DE 3 245 866 A1 ist eine MPP-Regelung angegeben, bei der zwischen Solargenerator und Lastwiderstand ein steuerbarer Gleichspannungswandler vorgesehen ist, der die Solarzellenspannung in eine am Lastwiderstand anliegende Ausgangsspannung wandelt. Strom- und Spannungsschwankungen auf der Eingangsseite der Anpassungsvorrichtung werden zur Ermittlung des Punktes maximaler Leistung (MPP) genutzt, indem jeweils bei der höchsten und bei der niedrigsten Spannung der Momentanwert der abgegebenen Leistung ermittelt und gespeichert wird. Eine Steuervorrichtung vergleicht die gespeicherten Leistungswerte und gibt die zu dem Leistungsmaximum gehörige Span-

nung als Sollwert an einen herkömmlichen Regler für den Gleichspannungswandler vor. Da keine gezielte Suche nach dem Leistungsmaximum erfolgt, wird der Arbeitspunkt der Solarzelle lediglich auf den besten, zufällig gefundenen Wert eingestellt. Es kann deshalb relativ lange dauern, bis nach einer Änderung der Umgebungsbedingungen ein entsprechender "optimaler" Arbeitspunkt gefunden wird.

[0012] DE 198 37 862 A1 betrifft ein Solarmodul mit einem MPP-Regler, bei dem ein Gleichspannungswandler durch einen Spannungsdetektor mit zwei Schaltschwellen gesteuert wird, wobei die Schaltschwellen derart festgelegt sind, daß der optimale Arbeitspunkt der Solarzellenanordnung zwischen den beiden Schaltschwellen liegt. Der Spannungsdetektor vergleicht die Solarzellenspannung mit den beiden Schaltschwellen und steuert den Gleichspannungswandler so, daß die Quellenspannung fortlaufend zwischen der Einschaltsschwelle und der Ausschaltsschwelle hin- und herpendelt, wobei jeweils der optimale Arbeitspunkt durchlaufen wird. Problematisch ist jedoch bei diesem Vorschlag das Festlegen der Schaltschwellen, die, um einen weiten Bereich der Bestrahlungsintensität abzudecken, weit auseinander liegen müssen, wodurch eine stark schwankende Quellenspannung bzw. Quellenleistung auftritt. Der optimale Arbeitspunkt wird zwar durchlaufen, die Solarzelle wird aber nicht kontinuierlich in diesem optimalen Arbeitspunkt betrieben.

[0013] In US 4 794 272 ist ein Leistungsregler für Solarsysteme mit Batterieladegerät angegeben, mit dem das Leistungsmaximum in Abhängigkeit von Spannungs- und Stromänderungen auf der Quellenseite oder der Lastseite eines Gleichspannungswandlers ermittelt wird. Die Ansteuerung des Gleichspannungswandlers erfolgt dabei über eine Pulsweitensteuerung, die den Arbeitspunkt der Solarzelle ausschließlich in Abhängigkeit vom über den Ladestrom erfaßten Ladezustand der Batterie einstellt.

[0014] US 6 281 485 B 1 offenbart einen MPP-Regler für Solarzellen. Der MPP-Regler erfaßt dazu periodisch die Quellenspannung und den Laststrom und ermittelt daraus durch Vergleich eine Quellenspannungsänderung und eine Leistungsänderung. In Abhängigkeit vom Vorzeichen der Quellenspannungsänderung, dem Vorzeichen der Leistungsänderung und dem Absolutwert der Leistungsänderung wird die Steuerspannung eines Gleichspannungswandlers verändert. Dabei wird von der MPP-Schaltung anhand des Vorzeichens von Quellenspannungsänderung und Leistungsänderung die Richtung festgelegt, in der der Arbeitspunkt zu verschieben ist, um eine höhere Leistung zu erzielen. Das Ziel dieses iterativen Vorgehens ist es, die Solarzelle bei der jeweils vorliegenden Zellenspannung mit maximaler Leistung zu betreiben. Anhand des Absolutwerts der Leistungsänderung wird ermittelt, ob bereits der optimale Arbeitspunkt erreicht wurde und keine weiteren Arbeitspunktverschiebungen mehr erfolgen sollen.

[0015] Da der in US 6 281 485 beschriebene MPP-Regler den Arbeitspunkt der Solarzelle mit konstanter Schrittweite verschiebt, kann es jedoch eine längere Zeit dauern, bis die MPP-Steuerung den optimalen Arbeitspunkt erreicht hat. Dies wird zudem dadurch erschwert, daß die Leistungs-Kennlinien von Solarzellen in Abhängigkeit von der Quellenspannung bzw. von einem Stellwert - der Steuerspannung des Gleichspannungswandlers - relativ flach sind. Ein Maximum der Leistungs-Kennlinie ist deshalb schwer zu ermitteln, und der tatsächliche Arbeitspunkt der Solarzellen pendelt, ähnlich wie gemäß der Lehre von DE 198 37 862, um den optimalen Arbeitspunkt hin und her. Dieses Problem wird weiterhin durch unvermeidbare Ungenauigkeiten und stets auftretendes Rauschen bei der Erfassung von Strom und Spannung verstärkt. Insbesondere eine Laststrommessung mit ausreichender Genauigkeit für die MPP-Regelung über einen weiten Bereich der zu erfassenden Ströme von beispielsweise 0 bis 25 A stellt hohe Anforderungen an den entsprechenden Sensor. Da die Richtung der Verschiebung des Arbeitspunkts vom Vorzeichen der Leistungsänderung bzw. der Laststromänderung festgelegt wird, können Strommeßfehler zu falschen Arbeitspunktverschiebungen und deshalb zu Problemen bei der Maximalwertsuche führen.

[0016] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, Verfahren und Vorrichtungen zur Anpassung elektrischer Lasten an eine Stromquelle anzugeben, bei denen ein scharfer Zusammenhang zwischen einer Steuergröße und der von der Stromquelle abgegebenen Stromquellen-Leistung bzw. der an der Last wirkenden Last-Leistung herangezogen wird, um der Stromquelle auf einfache Weise maximale Last-Leistung über die Last zu entnehmen. Insbesondere sollen ein MPP-Regler sowie ein Solarmodul angegeben werden.

[0017] Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch die unabhängigen Patentansprüche gelöst. Die abhängigen Ansprüche betreffen vorteilhafte Ausgestaltungen des Erfindungskonzepts.

[0018] Gemäß dem Erfindungskonzept weist die erfindungsgemäße Vorrichtung zur Anpassung einer elektrischen Last an eine Stromquelle mit gegebenenfalls wechselnder Stromquellen-Leistung, um der Stromquelle maximale Last-Leistung über die Last zu entnehmen, auf:

eine Differenziereinrichtung, die ein Ausgangssignal (I_Q , U_Q) der Stromquelle nach der Zeit (t) differenziert und ein der ersten Ableitung (dU_Q/dt , dI_Q/dt) oder der zweiten Ableitung (d^2U_Q/dt^2 , d^2I_Q/dt^2) entsprechendes Ausgangssignal liefert,

und

einen der Differenziereinrichtung nachgeschalteten Verstärker, an dessen Ausgang die Last anliegt und der das Ausgangssignal der Differenziereinrichtung verstärkt,

wobei der Verstärker derart mit der Stromquelle verbunden ist, daß die vom Verstärker aufgenommene Verstärker-

Leistung der Stromquelle entnommen wird, und das Ausgangssignal (U_A , I_A) des Verstärkers Schwingungen, insbesondere Resonanzschwingungen, aufweist.

[0019] Das Konzept des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Anpassung einer elektrischen Last an eine Stromquelle mit gegebenenfalls wechselnder Stromquellen-Leistung, um der Stromquelle maximale Last-Leistung über die Last zu entnehmen, umfaßt folgende Schritte:

- (I) Erfassen eines Ausgangssignals (U_Q , I_Q) der Stromquelle oder einer damit korrelierten elektrischen Größe,
- (II) Erzeugen der ersten Ableitung (dU_Q/dt , dI_Q/dt) des in (I) erfaßten Signals und gegebenenfalls der zweiten Ableitung (d^2U_Q/dt^2 , d^2I_Q/dt^2),
- (III) Verstärken des erhaltenen Ableitungssignals unter Erhalt eines verstärkten Ausgangssignals (U_A , I_A) und
- (IV) Anlegen des erhaltenen verstärkten Ausgangssignals (U_A , I_A) an die Last,

wobei die zum Verstärken in Schritt (III) beim verwendeten Verstärker erforderliche elektrische Verstärker-Leistung der Stromquelle entnommen wird, so daß das verstärkte Ausgangssignal (U_A , I_A) Schwingungen, insbesondere Resonanzschwingungen, aufweist.

[0020] Das Erfindungskonzept umfaßt ferner die Anwendung des obigen Verfahrens zur Steuerung oder Regelung von photovoltaischen Anlagen, insbesondere von Solarzellen und Solarpanels sowie Anordnungen daraus, wobei die Last insbesondere eine ohmsche Last, eine Batterie bzw. ein Akkumulator, ein Ladegerät, ein Gleichrichter, ein Wechselrichter, ein Transformator und/oder ein anderer elektrischer Wandler ist.

[0021] Die erfindungsgemäße Vorrichtung zur Anpassung elektrischer Lasten an eine Stromquelle weist eine Differenziereinrichtung auf, die ein Ausgangssignal (I_Q , U_Q) der Stromquelle nach der Zeit (t) differenziert. Die Differenziereinrichtung liefert ein der ersten Ableitung (dU_Q/dt , dI_Q/dt) oder der zweiten Ableitung (d^2U_Q/dt^2 , d^2I_Q/dt^2) entsprechendes Ausgangssignal. Zur Bildung der zweiten Ableitung können auch zwei einfache Differenzierglieder 1-ter Ordnung in Serie geschaltet werden. Die Differenziereinrichtung kann analog und/oder digital realisiert werden. Sie kann ihre Versorgungsspannung von der Stromquelle beziehen. Durch die Differenzierung wird eine scharfe Relation zwischen einer Steuergröße und der Stromquellen- oder Last-Leistung erzielt.

[0022] Unter einer Stromquelle im Sinne der vorliegenden Erfindung sind alle elektrischen Signalquellen zu verstehen, insbesondere solche, die ein Strom- oder Spannungssignal liefern. Die Stromquelle kann Solarzellen, Brennstoffzellen oder andere elektrische Energie liefernde Quellen aufweisen. Der Zusammenhang zwischen Strom und Spannung der Stromquelle wird meist durch eine entsprechende Strom-Spannungs-Kennlinie beschrieben, welche die Eigenschaften der Stromquelle kennzeichnet. Abhängig von bestimmten Umgebungsbedingungen, wie Temperatur und Bestrahlungsstärke bei einer photovoltaischen Stromquelle, wird von der Stromquelle bei einem optimalen Arbeitspunkt maximale Stromquellen-Leistung (P_Q) erzeugt.

[0023] Der Differenziereinrichtung ist erfindungsgemäß ein Verstärker nachgeschaltet, an dessen Ausgang die Last anliegt und der das Ausgangssignal der Differenziereinrichtung verstärkt. Der Verstärker kann eine lineare oder nicht-lineare Verstärkungskennlinie aufweisen und in einem linearen und/ oder nichtlinearen Kennlinienbereich betrieben werden. Er kann mit einem konstanten oder einem variablen Verstärkungsgrad (F) betrieben werden. Es ist möglich, den Verstärker in analoger und/oder digitaler bzw. hybrider Technik zu realisieren. Verstärker und Differenziereinrichtung können auch gemeinsam, z.B. auf einem Halbleiterchip, vorgesehen werden. Vorteilhafterweise weist der Verstärker einen hohen Wirkungsgrad und eine geringe Verlustleistung auf.

[0024] Der Verstärker ist derart mit der Stromquelle verbunden, daß die vom Verstärker aufgenommene Verstärkerleistung (P_V) der Stromquelle entnommen wird. Es ist zweckmäßig, die Versorgungsleitungen des Verstärkers mit der Stromquelle zu verbinden, wobei gegebenenfalls eine entsprechende Anpassung der Quellenspannung an die benötigte Versorgungsspannung des Verstärkers, z.B. durch einen Spannungswandler, vorgesehen ist. Da eine eventuelle Leistungsaufnahme der Differenziereinrichtung zu vernachlässigen ist, stellt der Verstärker die hauptsächliche direkte Last der Stromquelle dar. Durch die vom Verstärker aufgenommene Verstärkerleistung (P_V) zur Verstärkung des Ausgangssignals der Differenziereinrichtung wird die Stromquelle belastet. Bedingt durch den in den Kennlinien der Stromquelle ausgedrückten Zusammenhang zwischen Strom und Spannung verringert sich das Ausgangssignals der Stromquelle bei Belastung der Stromquelle durch den Verstärker. Aufgrund dieser Rückkopplung zwischen Verstärker und Stromquelle können Schwingungen des Ausgangssignals (U_A , I_A) des Verstärkers entstehen.

[0025] Bei geeigneter Wahl des Verstärkungsfaktors (F) können Resonanzeffekte auftreten, und am Ausgang des Verstärkers können sich Resonanzschwingungen bilden. Die aufgrund des Resonanzeffekts auftreten Resonanzschwingungen können bestimmte charakteristische Frequenzen aufweisen. Stromquelle, Differenziereinrichtung, Verstärker und Last bilden einen Oszillator. Im Resonanzfall entnimmt dieses schwingende System der Quelle maximale Leistung, die an der Last als maximale Last-Leistung (P_A) auftritt. Die Stromquelle wird so immer im optimalen Arbeitspunkt (MPP) betrieben.

[0026] Da das Auftreten von Resonanzschwingungen bei einem schwingungsfähigen System von der Erfüllung einer relativ scharf abgegrenzten Schwingungsbedingung abhängt, ist bei der erfindungsgemäßen Vorrichtung, wenn das

Ausgangssignal des Verstärkers Resonanzschwingungen aufweist, eine einfache Entnahme maximaler Leistung möglich. Zweckmäßigerweise wird somit der Verstärkungsgrad des Verstärkers derart eingestellt, daß die Schwingungsbedingung erfüllt ist und Resonanzschwingungen auftreten. Da die Schwingungen des Verstärkerausgangssignals in Abhängigkeit vom Verstärkungsgrad (F) des Verstärkers in einem relativ scharf begrenzten Bereich des Verstärkungsgrads auftreten, ist es erfindungsgemäß sehr einfach, den erforderlichen Verstärkungsgrad einzustellen. Im Gegensatz zum Stand der Technik erfordert die erfindungsgemäße Vorrichtung keine aufwendige Suche eines Leistungsmaximums in einer relativ flachen Leistungs-Kennlinie.

[0027] Auch eine wechselnde Last hat erfindungsgemäß keinen direkten Einfluß auf den sich ergebenden Arbeitspunkt der Stromquelle und die der Stromquelle entnommene Leistung. Solange die Schwingungsbedingung des Oszillators erfüllt ist, schwingt der Ausgang des Verstärkers, und maximale Leistung wird der Quelle entnommen und der Last zugeführt. Gegebenenfalls ist eine Anpassung des Verstärkungsgrades an einen veränderten Lastwiderstand notwendig, um die Schwingungsbedingung weiter zu erfüllen. Diese Nachführung des Verstärkungsgrades kann, wie bereits erläutert, relativ einfach durchgeführt werden.

[0028] Die Stromquelle kann zweckmäßigerweise eine oder mehrere photovoltaische Zellen (Solarzellen) aufweisen oder daraus bestehen. Die Solarzellen können als Solarpanels ausgebildet sein. Ein Solarpanel weist eine flächige Anordnung von miteinander verschalteten Solarzellen auf. Bevorzugte Solarpanels wie der Typ SM 110 von Siemens sind für eine Nennspannung von 12 V ausgelegt, erzeugen eine Leerlaufspannung von 17,5 V und eine Nennleistung von 110 W (rated power). Um eine höhere Ausgangsspannung und/oder Leistung zu erzielen, ist es vorteilhaft, mehrere Solarpanels in Serie bzw. parallel zu schalten. Auf diese Weise können standardmäßige Ausgangsspannungen von beispielsweise 60 bis 220 V und Nennleistungen von einigen Kilowatt erzielt werden.

[0029] Weiterhin können durch die erfindungsgemäße Vorrichtung auch auftretende periodische Modulationen des Sonnenlichts zur Erzeugung von elektrischer Leistung genutzt werden. Diese Modulationen haben ein komplexes Spektrum mit einem Resonanzmaximum. Diese modulierte Strahlung enthält Energie, die zu einer AC-Komponente des von einer Solarzelle als Stromquelle erzeugten Signals führt. Diese AC-Komponente trägt zur Anregung der (Resonanz-)Schwingungen bei und wird von der erfindungsgemäßen Vorrichtung genutzt.

[0030] Vorteilhafterweise weist die Vorrichtung eine Einstelleinrichtung für den Verstärkungsgrad (F) des Verstärkers auf, die auf den Verstärker wirkt. Die Einstelleinrichtung kann eine manuelle Einstellung des Verstärkungsgrads, beispielsweise über ein Potentiometer, ermöglichen. Es ist besonders vorteilhaft, wenn die Einstelleinrichtung eine halbautomatische oder automatische Einstellung des Verstärkungsgrads durchführt. Sie kann dabei beispielsweise über ein elektronisches Potentiometer auf den Verstärker wirken und den erforderlichen Verstärkungsgrad einstellen, der die Schwingungsbedingung zum Erhalt von Resonanzschwingungen am Verstärkerausgang erfüllt. Der Verstärker kann auch einen steuerbaren Vorverstärker (VCA — Voltage Controlled Amplifier) und einen Leitungsverstärker mit hohem Wirkungsgrad umfassen. Eine zweckmäßige Ausgestaltung der Einstelleinrichtung sieht Mittel vor, die den Verstärkungsgrad (F) des Verstärkers so lange ändern, bis Resonanzschwingungen am Verstärkerausgang auftreten.

[0031] Um Störsignale zu unterdrücken, ist es zweckmäßig, eine Filtereinrichtung zwischen dem Ausgang der Differenzierereinrichtung und dem Eingang des Verstärkers vorzusehen. Die Filtereinrichtung filtert das Ausgangssignal des Verstärkers nach einer vorgegebenen Durchlaßcharakteristik, wobei es besonders vorteilhaft ist, ein Bandpaßfilter zum Filtern des Verstärkereingangssignals heranzuziehen. Durch ein Bandpaßfilter können niederfrequente Störungen, insbesondere die Netzfrequenz 50 Hz, und hochfrequentes Rauschen im Anregungssignal unterdrückt werden. Durch das Bandpaßfilter wird es auch ermöglicht, die Frequenzen der Resonanzschwingungen zu beeinflussen und eine scharfe Resonanz des schwingenden Systems zu erzielen. Vorteilhafte Bandpaßfilter sind Krohn-Hite-Filter mit Eckfrequenzen von 20 Hz und 200 kHz. Ein besonders vorteilhafter Durchlaßbereich liegt zwischen 1,0 und 5,0 kHz.

[0032] Ein besonders geeigneter Verstärker zur Verstärkung des Ausgangssignals der Differenzierereinrichtung ist ein Operationsverstärker. Operationsverstärker sind einfach zu beschalten, weisen einen großen Verstärkungsbereich auf und haben einen hohen Wirkungsgrad. Die erfindungsgemäße Vorrichtung kann aber auch analoge und/oder digitale Verstärker einer der Klassen A bis T oder einen adaptiven Power-MOSFET-Verstärker aufweisen. Beispiele für bevorzugte Verstärker sind die Tripath Audio-Verstärker der Serie TA, insbesondere der TA3020. Um Resonanzschwingungen über einen breiten Frequenzbereich zu ermöglichen, ist ein breitbandiger Verstärker von Vorteil. Ein besonders zweckmäßiger Übertragungsbereich beträgt 10 Hz bis 100 MHz. Es ist erfindungsgemäß aber auch möglich, Verstärker mit einer Bandbreite im Audiobereich vorzusehen, insbesondere von 20 Hz bis 40 kHz.

[0033] Der Arbeitspunkt des Verstärkers kann auch in einem nichtlinearen Bereich seiner Verstärkungskennlinie liegen, was für die Einstellung des Verstärkungsgrades vorteilhaft sein kann. Durch den nichtlinearen Betrieb des Verstärkers können auch quasi-rechteckige Schwingungsformen erzielt werden.

[0034] Gemäß einer vorteilhaften Ausgestaltung der Vorrichtung weist die Einstelleinrichtung eine Erfassungseinrichtung auf, welche die von der Stromquelle abgegebene Stromquellen-Leistung (P_Q) und/ oder die von der Last aufgenommene Last-Leistung (P_A) und/oder eine mit diesen Leistungen korrelierte elektrische Größe (U_A , I_A ; U_Q , I_Q) erfaßt.

[0035] Die Erfassungseinrichtung kann insbesondere den Strom und/oder die Spannung der Stromquelle bzw. der

Last erfassen, um die stromquellen- bzw. lastseitige Leistung zu ermitteln. Die Meßgrößen können von einem entsprechenden Sensor erfaßt und vor der Bestimmung der Leistung vorverarbeitet werden. Zweckmäßigerweise werden die erfaßten Meßgrößen gefiltert, geglättet und/ oder gewandelt. Insbesondere ist es von Vorteil, den erfaßten Strom und/ oder die erfaßte Spannung in entsprechende Gleichspannungsgrößen (Effektivwerte) zu wandeln. Hierzu kann u.a.

ein RMS-Wandler eingesetzt werden. Die äquivalenten Gleichspannungsgrößen können einfacher weiterverarbeitet werden, insbesondere, um den Verstärkungsgrad des Verstärkers einzustellen.

[0036] Anhand der von der Erfassungseinrichtung erfaßten Größe kann die Einstelleinrichtung den erforderlichen Verstärkungsgrad (F) des Verstärkers einstellen. Die Einstelleinrichtung wertet zweckmäßigerweise die erfaßte Größe aus und bestimmt das Maximum der erfaßten Größe bzw. der Leistung in Abhängigkeit vom Verstärkungsgrad. Aufgrund der scharfen Resonanzbedingung, die für ein schwingungsfähiges System erfüllt sein muß, tritt ein ausgeprägtes Maximum der stromquellen- oder lastseitigen Leistung auf, das einfach zu ermitteln ist. Der entsprechende Verstärkungsgrad kann so auf einfache Weise bestimmt werden.

[0037] Zweckmäßigerweise weist die Einstelleinrichtung einen Regler auf, der die Ausgangssignale der Erfassungseinrichtung als solche oder nach Signalverarbeitung als Istwerte erfaßt und den Verstärkungsgrad des Verstärkers regelt. In diesem Fall stellt die Vorrichtung einen MPP-Regler dar.

[0038] Der Regler der Einstelleinrichtung kann ein beliebiger analoger und/oder digitaler Regler sein. Die Regelcharakteristik des Reglers kann vorteilhafterweise den Eigenschaften der übrigen Komponenten der Vorrichtung, insbesondere den Eigenschaften des Verstärkers, der Stromquelle und/ oder der Last, angepaßt werden. Bevorzugte Regelcharakteristiken sind P-, I-, PI-, PD-, Log- und Exp-Regler. Der Regler kann auch adaptiv sein und seine Kennlinie und/oder Parameter den Arbeitsbedingungen anpassen. Auch eine digitale Regelung des Verstärkungsfaktors, beispielsweise durch einen Mikrokontroller, kann zweckmäßigerweise vorgesehen sein.

[0039] Der Regler ist zweckmäßigerweise so ausgebildet, daß er den Verstärkungsgrad (F) des Verstärkers so regelt, daß die Last-Leistung (P_A) maximiert wird. Auf diese Weise wird der Stromquelle maximale Leistung über den Lastwiderstand entnommen, wobei die Einstellung des Verstärkungsgrads bedingt durch die Schwingungsfähigkeit des Systems besonders vorteilhaft erfolgen kann.

[0040] Der Regler kann vorteilhafterweise als Maximumregler ausgebildet sein, der einen Sollwertgenerator aufweist, welcher in Abhängigkeit von einem Stellwert des Reglers, insbesondere dem Verstärkungsgrad (F), einen Sollwert für die Regelung erzeugt. Der Sollwertgenerator kann anhand des Reglerstellwerts einen dynamischen Sollwert für den Regler erzeugen, um das Maximum der zu regelnden Größe zu ermitteln. Es ist beispielsweise möglich, den dynamischen Sollwert anhand des Reglerstellwertes - Verstärkungsgrad (F) des Verstärkers - zu erzeugen. Der dynamische Sollwert kann zweckmäßigerweise mit fortlaufender Zeit ansteigen, solange der Stellwert eine bestimmte vorgegebene Bedingung erfüllt. Die vorgegebene Bedingung ist vorzugsweise ein Grenzwert für den Stellwert, der vom Regler überwacht wird. Durch das Ansteigen des Regelungssollwerts werden auch - soweit durch das gegebene Regelungssystem möglich - der Stellwert und der Istwert der Regelstrecke ansteigen. Überschreitet der Stellwert den vorgegebenen Grenzwert, so wird vom Maximumregler ein mit der Zeit abfallender Sollwert erzeugt. Durch den abnehmenden Sollwert wird auch der Stellwert kleiner und nach einer gewissen Zeit die vorgegebene Bedingung wieder erfüllen, worauf der Maximumregler erneut einen ansteigenden Sollwert erzeugt. Ein derartiger Maximumregler findet automatisch das Maximum der zu regelnden Größe bzw. des Istwerts des Regelsystems. Die zu regelnde Größe, hier die stromquellen- oder lastseitige Leistung, nähert sich in ansteigenden und abfallenden Rampen ihrem maximal möglichen Wert an. Diese Annäherung erfolgt besonders vorteilhaft, wenn die Abnahme des Sollwerts schneller bzw. steiler erfolgt als die Zunahme des Sollwerts. Ein solcher Maximumregler ist per se, jedoch nicht in Verbindung mit dem erfindungsgemäß angewandten Oszillationsprinzip, bekannt (DE 198 46 818 A1).

[0041] Gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung weist die Einstelleinrichtung einen Vergleicher auf, der zu vorgegebenen Zeitpunkten den Wert einer oder mehrerer der von der Erfassungseinrichtung erfaßten Größen (P_Q , P_A ; U_Q , I_Q ; U_A , I_A) mit dem Wert der betreffenden Größe zum vorhergehenden Zeitpunkt vergleicht und den jeweiligen Differenzwert bildet. Der Differenzwert der betreffenden Größe gibt die Änderung der Größe in bezug auf den vorhergehenden Zeitpunkt an. Er zeigt an, ob sich beispielsweise die entsprechende Größe infolge einer Änderung des Verstärkungsgrads (F) vergrößert oder verringert hat. Der Differenzwert kann dem Regler zugeführt werden, der, je nach Art der erfaßten Größe, den Verstärkungsgrad des Verstärkers anhand des Differenzwerts so steuert, daß die Last-Leistung (P_A) bzw. die Stromquellen-Leistung (P_Q) maximiert wird. Steigt beispielsweise die Leistung infolge einer Änderung des Verstärkungsgrads an, ist es zweckmäßig, den Verstärkungsgrad weiter zu erhöhen, um das Leistungsmaximum und den zugehörigen Verstärkungsgrad zu ermitteln. Umgekehrt kann der Regler, wenn der Wert der von der Erfassungseinrichtung erfaßten Größe oder das Ausgangssignal des Vergleichers abfällt, den Verstärkungsgrad verringern.

[0042] Der Regler kann den Verstärkungsgrad (F) des Verstärkers vorzugsweise in Abhängigkeit einer Änderung des Verstärkungsgrads (F) zu einem vorhergehenden Zeitpunkt und dem Betrag der daraus resultierenden Änderung der Stromquellen-Leistung (P_Q) und/ oder der Last-Leistung (P_A) ändern. Um das Maximum der Leistung zu finden, ist es zweckmäßig, daß der Regler den Verstärkungsgrad (F) des Verstärkers erhöht, wenn der Verstärkungsgrad (F)

bei der vorhergehenden Änderung erhöht wurde und vom Vergleich einer positiven Änderung der Stromquellen-Leistung (P_Q) und/ oder der Last-Leistung (P_A) ermittelt wird oder wenn der Verstärkungsgrad (F) bei der vorhergehenden Änderung verringert wurde und vom Vergleich einer negativen Änderung der Stromquellen-Leistung (P_Q) und/ oder der Last-Leistung (P_A) ermittelt wird. Der Regler verringert zweckmäßigerweise den Verstärkungsgrad (F) des Verstärkers, wenn der Verstärkungsgrad (F) bei der vorhergehenden Änderung erhöht wurde und vom Vergleich einer negativen Änderung der Stromquellen-Leistung (P_Q) und/ oder der Last-Leistung (P_A) ermittelt wird oder wenn der Verstärkungsgrad (F) bei der vorhergehenden Änderung verringert wurde und vom Vergleich einer positiven Änderung der Stromquellen-Leistung (P_Q) und/ oder der Last-Leistung (P_A) ermittelt wird.

[0043] Eine besonders schnelle Einstellung des Verstärkungsgrades des Verstärkers kann erzielt werden, wenn die Einstelleinrichtung eine Optimierungseinrichtung aufweist, die ein Optimierungsverfahren ausführt. Das Optimierungsverfahren ermittelt das Maximum der von der Stromquelle abgegebenen Stromquellen-Leistung (P_Q) und/ oder der von der Last aufgenommenen Last-Leistung (P_A) in Abhängigkeit vom Verstärkungsgrad (F). Zur Ermittlung des Maximums der Leistungs-Kennlinie sind eine Reihe bekannter Optimierungsverfahren geeignet. Aufgrund des komplexen Zusammenhangs zwischen Verstärkungsgrad und stromquellen- bzw. lastseitiger Leistung sind besonders iterative Optimierungsverfahren geeignet, die verschiedene Arbeitspunkte bzw. Verstärkungsfaktoren prüfen, um sich dem Maximum iterativ zu nähern.

[0044] Ein besonders bevorzugtes iteratives Optimierungsverfahren ist das Gradientenverfahren (Newton-Verfahren), das die Steigung der Leistungs-Kennlinie auswertet, um das Leistungsmaximum zu bestimmen. Anhand der Steigerung der Leistungs-Kennlinie im aktuellen Arbeitspunkt werden Schrittweite und Richtung für die nächste Änderung des Arbeitspunkts festgelegt. Dabei wertet das Gradientenverfahren den Zusammenhang zwischen Stellgröße (Verstärkungsgrad) und Zielgröße (Leistung) in Form der entsprechenden partiellen Ableitung aus.

[0045] Gemäß einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung weist die Einstelleinrichtung eine Korrektoreinrichtung auf, die eine parametrische Größe der Stromquelle erfaßt und in Form eines elektrischen Korrektursignals an den Regler liefert. Der Regler kann ein entsprechend korrigiertes Ausgangssignal bzw. Stellsignal zur Steuerung des Verstärkungsgrades abgeben, um eine Korrektur des Verstärkungsgrades unter Berücksichtigung des erfaßten Stromquellenparameters auszuführen. Auf diese Weise kann beispielsweise die Stromquellen-Temperatur (T_Q) bei der Einstellung des Verstärkungsgrades berücksichtigt werden. Dies ist besonders bei der Verwendung von Solarzellen als Stromquelle von Vorteil, da die Strom-Spannungs-Kennlinien von Solarzellen stark temperaturabhängig sind. Zur Erfassung der Stromquellenparameter können entsprechende Sensoren, beispielsweise ein Temperatursensor zur Erfassung der Solarzellentemperatur, vorgesehen sein.

[0046] Um einen Verbraucher mit Gleichstrom bzw. Gleichspannung zu betreiben, kann zwischen dem Ausgang des Verstärkers und der Last eine Gleichrichtereinrichtung vorgesehen sein, die das Ausgangssignal des Verstärkers gleichrichtet. Durch das Vorsehen einer Wechselrichtereinrichtung kann aus dem schwingenden Verstärkerausgangssignal ein sinusförmiger Wechselstrom zum Betreiben von entsprechenden Lasten erzeugt werden. Es ist weiterhin möglich, den Wechselstrom über einen Lasttrafo in ein lokales und/ oder öffentliches (Leitungs-)Netz einzuspeisen. Als Last kann insbesondere eine ohmsche Last, eine Batterie bzw. ein Akkumulator, ein Ladegerät, ein Gleichrichter, ein Wechselrichter, ein Transformator oder ein anderer elektrischer Wandler vorgesehen sein.

[0047] Ein besonders vorteilhaftes Ausführungsbeispiel der Erfindung sieht eine symmetrische, bipolare Anordnung von Solarpanel, Differenziereinrichtung, gegebenenfalls Filtereinrichtung und Verstärker vor. Durch eine Zweidrahtverkabelung werden der positive und der negative Anschluß eines Solarpanels mit der Differenziereinrichtung verbunden. Auch die anderen Komponenten der Vorrichtung können durch die symmetrische bipolare Zweidrahtverkabelung verbunden werden. Durch die symmetrische Einspeisung können Verstärker (Gegentakt-Verstärker) mit höherem Wirkungsgrad und größerem Ein- und Ausgangswiderstand verwendet werden.

[0048] Eine Solarzelle oder mehrere Solarzellen als Stromquelle zur Erzeugung von elektrischer Leistung sowie eine erfindungsgemäße Vorrichtung, insbesondere ein MPP-Regler, können vorzugsweise auch als Solarmodul ausgebildet sein. Insbesondere ist es möglich, daß Differenziereinrichtung, gegebenenfalls Filtereinrichtung, Verstärker und Einstelleinrichtung als eine Einheit, insbesondere als ein analoger und/ oder digitaler Halbleiterchip, ausgebildet sind. Die Komponenten der erfindungsgemäßen Vorrichtung können auch ganz und/ oder teilweise durch einen Mikrocomputer realisiert werden.

[0049] Im folgenden wird das erfindungsgemäße Verfahren erläutert, das die nachstehenden Schritte umfaßt:

(I) Erfassen eines Ausgangssignals (U_Q , I_Q) der Stromquelle oder einer damit korrelierten elektrischen Größe;

(II) Erzeugen der ersten Ableitung (dU_Q/dt , dI_Q/dt) des in (I) erfaßten Signals und gegebenenfalls der zweiten Ableitung (d^2U_Q/dt^2 , d^2I_Q/dt^2);

(III) Verstärken des erhaltenen Ableitungssignals unter Erhalt eines verstärkten Ausgangssignals (U_A , I_A) und

(IV) Anlegen des erhaltenen verstärkten Ausgangssignals (U_A , I_A) an die Last.

[0050] Da die zum Verstärken in Schritt (III) beim verwendeten Verstärker erforderliche elektrische Verstärkerleistung (P_V) der Stromquelle entnommen wird, entsteht eine Rückkopplung des Verstärkers auf die Stromquelle, so daß das verstärkte Ausgangssignal Schwingungen, insbesondere Resonanzschwingungen, aufweist.

[0051] Vorzugsweise wird zum Verstärken in Schritt (III) ein Verstärker verwendet, dessen aufgenommene elektrische Verstärkerleistung (P_V) nicht konstant, sondern von der Größe des verstärkten Ausgangssignals (U_A , I_A) und/oder von der in Schritt (IV) von der Last aufgenommenen Last-Leistung (P_A) abhängig ist, so daß eine zeitlich wechselnde Belastung der Stromquelle auftritt.

[0052] Um störende Signalkomponenten zu unterdrücken, ist es vorteilhaft, das Ableitungssignal nach Schritt (II) und vor Schritt (III) zu filtern. Eine besonders günstige Anregung des oszillierenden Systems kann durch eine Filterung des zu verstärkenden Signals nach einer vorgegebenen Bandpaß-Durchlaßcharakteristik erzielt werden.

[0053] Zweckmäßigerweise wird das Verstärken in Schritt (III) bei einstellbarem Verstärkungsgrad (F) des Verstärkers vorgenommen, um das rückgekoppelte System zu Schwingungen anzuregen und die Oszillationsbedingung zu erfüllen. Durch das Verändern des Verstärkungsgrades kann das schwingungsfähige System, besonders ein Solarsystem, an die aktuellen Arbeitsbedingungen, wie Beleuchtungsstärke und Lastwiderstand, angepaßt werden. Der Verstärkungsgrad wird vorteilhafterweise so eingestellt, daß die Schwingungsbedingung für die aktuellen Arbeitsbedingungen erfüllt ist.

[0054] Der Verstärkungsgrad (F) wird vorzugsweise so eingestellt, daß die von der Last aufgenommene Last-Leistung (P_A) maximiert wird. Die Einstellung des Verstärkungsgrades erfolgt zweckmäßigerweise durch einen analogen und/oder digitalen Regler, insbesondere einen Maximalwertregler, der automatisch einen maximalen Wert der zu steuernden Größe ermittelt.

[0055] Eine vorteilhafte Ausgestaltung des Verfahrens sieht vor, daß in Abhängigkeit von einem Stellwert der Regelung, insbesondere dem Verstärkungsgrad (F), ein Sollwert für die Regelung erzeugt wird. Dabei ist es zweckmäßig, einen ansteigenden Sollwert zu erzeugen, solange der Stellwert eine vorgegebene Bedingung erfüllt, und im anderen Falle einen zeitlich abfallenden Sollwert zu erzeugen.

[0056] Zur Steuerung des Verstärkungsgrades (F) des Verstärkers kann zu vorgegebenen Zeitpunkten der Wert einer oder mehrerer der Größen P_Q , P_A , U_Q , I_Q , U_A , I_A mit dem Wert der betreffenden Größe zum vorhergehenden Zeitpunkt verglichen und der jeweilige Differenzwert gebildet werden. Die Steuerung des Verstärkungsgrades erfolgt zweckmäßigerweise unter Berücksichtigung dieses Differenzwerts, der die Änderung der entsprechenden Größe im Vergleich zum vorhergehenden Zeitpunkt angibt.

[0057] In Schritt (III) kann ein Optimierungsverfahren angewandt werden, um durch (iterative) Einstellung des Verstärkungsgrades (F) die von der Last aufgenommene Last-Leistung (P_A) bzw. die Stromquellen-Leistung (P_Q) zu maximieren. Besonders geeignet zur Optimierung der Leistung sind Gradientenverfahren, die die Ableitung der Leistung bezüglich der einzustellenden Größe (Verstärkungsgrad) berücksichtigen.

[0058] Um parametrische Werte der Stromquelle, insbesondere die Temperatur der Stromquelle, bei der Einstellung des Verstärkungsgrades des Verstärkers zu berücksichtigen, können die Parameterwerte der Stromquelle durch entsprechende Sensoren erfaßt und für eine Korrektur des Verstärkungsgrades herangezogen werden.

[0059] Vorzugsweise wird der Verstärkungsgrad (F) so eingestellt, daß der Arbeitspunkt des Verstärkers in einem nichtlinearen Bereich seiner Verstärkungskennlinie liegt.

[0060] Das verstärkte Ausgangssignal (U_A , I_A) wird zweckmäßigerweise an eine ohmsche Last, eine Batterie bzw. einen Akkumulator, ein Ladegerät, einen Gleichrichter, einen Wechselrichter, einen Transformator oder einen anderen elektrischen Wandler angelegt.

[0061] Das dargestellte Konzept der Erfindung beschränkt sich nicht auf die erläuterten Ausführungsformen, sondern erfaßt das grundsätzliche Prinzip, einer Strom- bzw. Signalquelle über einen Verstärker mit oszillierendem Ausgangssignal maximale Leistung zu entnehmen, wobei der Verstärker als Last auf die Quelle zurückwirkt.

[0062] Im Folgenden werden bevorzugte Ausführungsbeispiele der Erfindung anhand der Zeichnung erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 ein Beispiel für eine Strom-Spannungs-Kennlinie einer Solarzellenanordnung;

Fig. 2 ein Beispiel für eine Leistungs-Kennlinie einer Solarzellenanordnung;

Fig. 3 ein Diagramm der Strahlungsintensität während des Verlaufs eines Tages;

Fig. 4 schematisch ein Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Vorrichtung;

Fig. 5 schematisch ein weiteres Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Vorrichtung;

Fig. 6a ein Ersatzschaltbild eines erfindungsgemäßen Solarmoduls für eine Lastbetrachtung zur Erläuterung der Erfindung;

Fig. 6b ein Ersatzschaltbild eines erfindungsgemäßen Solarmoduls für eine Signalbetrachtung zur Erläuterung der Erfindung;

Fig. 7 ein Frequenzdiagramm einer am Verstärkerausgang auftretenden Schwingung;

Fig. 8 eine schematische Darstellung einer Regelung des Verstärkungsgrades F;

Fig. 9 eine schematische Darstellung eines Versuchsaufbaus;

Fig. 10 graphische Darstellungen zum Verlauf von Strom, Spannung und Temperatur eines Meßwiderstands und

Fig. 11 graphische Darstellungen einer experimentellen Auswertung.

[0063] Fig. 4 zeigt schematisch ein Ausführungsbeispiel der erfindungsgemäßen Vorrichtung 1 zur Anpassung einer elektrischen Last 2 an eine Stromquelle 3. Die Anpassung der elektrischen Last 2 erfolgt nach dem beanspruchten Oszillationsprinzip, um der Stromquelle 3 maximale Last-Leistung P_A über die Last 2 zu entnehmen. Die Anpassung kann im Hinblick auf eine wechselnde Lastimpedanz R_L und/ oder einen veränderlichen Innenwiderstand R_Q der Stromquelle 3 erfolgen.

[0064] Die Stromquelle 3, beispielsweise eine Solarzellenanordnung (Solarpanel), kann in Abhängigkeit von unterschiedlichen Bedingungen, z.B. Umgebungsbedingungen, eine wechselnde Stromquellen-Leistung P_Q erzeugen. So sind beispielsweise Strom I_Q und Spannung U_Q einer Solarzelle von der Beleuchtungsstärke und der Solarzellentemperatur T_Q abhängig.

[0065] Die Vorrichtung 1 weist eine Differenziereinrichtung 4 auf, welche die Ausgangsspannung U_Q der Stromquelle 3 nach der Zeit t differenziert und ein der ersten Ableitung $\frac{dU_Q}{dt}$ oder der zweiten Ableitung $\frac{d^2U_Q}{dt^2}$ entsprechendes

Ausgangssignal liefert. In dem gezeigten Ausführungsbeispiel bildet die Differenziereinrichtung 4 die zweite Ableitung $\frac{d^2U_Q}{dt^2}$ der Spannung U_Q der Stromquelle. Die Differenziereinrichtung 4 kann beispielsweise durch einen entsprechend beschalteten Operationsverstärker realisiert werden. Ein typischer Operationsverstärker ist beispielsweise ein LN357N-Baustein.

[0066] Der Differenziereinrichtung 4 ist ein Bandpaßfilter 7 nachgeschaltet, welches das Ausgangssignal der Differenziereinrichtung 4 nach einer vorgegebenen Bandpaßcharakteristik filtert, um Störsignale zu entfernen und eine scharfe Resonanz des schwingenden Systems zu erzielen. Das Bandpaßfilter 7 kann beispielsweise einen Durchlaßbereich von bis zu 5 kHz aufweisen. Der geeignete Durchlaßbereich ist, gegebenenfalls durch einfache Versuche, leicht zu ermitteln.

[0067] Der Ausgang der Filtereinrichtung 7 ist mit dem Signaleingang eines Verstärkers 5 verbunden. Die Versorgungsspannung des Verstärkers 5 bzw. die Verstärker-Leistung P_V wird der Stromquelle 3 entnommen. Vorzugsweise wird ein digitaler Audioverstärker der T-Klasse mit hohem Wirkungsgrad verwendet. Derartige Verstärker weisen eine geringe Verzerrung, geringes Rauschen, einen großen Dynamikbereich und eine hohe Störfestigkeit gegenüber Störungen oder Rauschen der Versorgungsspannung auf. Verstärker der T-Klasse bestehen aus einem CMOS-Signalverarbeitungsteil und einem DMOS-Leistungstransistor. Ein bevorzugter Verstärker mit hohem Wirkungsgrad ist der Baustein TA3020 von Tripath. Zur Einstellung des Verstärkungsgrades kann beispielsweise der spannungsgesteuerte Vorverstärker ST-VCA2 von Radio Design Labs eingesetzt werden.

[0068] Der Verstärkungsgrad F des Verstärkers 5 wird von einer Einstelleinrichtung 8 derart geregelt, daß die Last-Leistung P_A , die dem Verbraucher 2 zugeführt wird, maximiert wird. Um die von der Last 2 aufgenommene Last-Leistung P_A zu erfassen, weist die Einstelleinrichtung 8 eine Erfassungseinrichtung 10 auf, die den durch die Last fließenden Strom I_A und die an der Last abfallende Ausgangsspannung U_A des Verstärkers 5 erfaßt. Die Erfassungseinrichtung 10 kann durch Multiplikation des Stroms I_A und der Spannung U_A die von der Last aufgenommene Last-Leistung P_A ermitteln. Es ist selbstverständlich auch möglich, nur den Strom I_A oder die Spannung U_A zu erfassen und die Last-Leistung P_A nur anhand der erfaßten Größe zu bestimmen. Dies ist insbesondere bei bekannter und konstanter Lastimpedanz R_L vorteilhaft, da nur ein Sensor zur Ermittlung der Last-Leistung P_A benötigt wird. Auch bei variabler Lastimpedanz R_L kann die Last-Leistung P_A geeignet abgeschätzt werden. Anstatt die Last-Leistung P_A zu maximieren, ist es weiterhin möglich, eine der mit der Leistung korrelierten elektrischen Größen (U_A , I_A) zu optimieren.

[0069] Die in Fig. 1 gezeigte Einstelleinrichtung 8 weist weiter einen Vergleicher 6 auf, der zu vorgegebenen Zeitpunkten t_i , beispielsweise alle 100 ms, den Wert der von der Erfassungseinrichtung 10 ermittelten Last-Leistung $P_A(t_i)$ mit dem Wert der betreffenden Größe zum vorhergehenden Zeitpunkt $P_A(t_{i-1})$ vergleicht und einen Differenzwert $\Delta P_A(t_i)$ bildet. Der Differenzwert $\Delta P_A(t_i)$ gibt die Änderung der Last-Leistung P_A in bezug auf den vorhergehenden Auswertzeitpunkt t_{i-1} an. Ein positiver Differenzwert $\Delta P_A(t_i)$ zeigt an, daß die Last-Leistung P_A zugenommen hat, beispielsweise infolge einer Änderung des Verstärkungsgrades F , und umgekehrt.

[0070] Der Differenzwert ΔP_A wird einem Regler 9 zugeführt, der den Verstärkungsgrad F des Verstärkers 5 anhand des Differenzwerts derart steuert, daß die Last-Leistung P_A maximiert wird. Der Regler 9 kann beispielsweise den Verstärkungsgrad $F(t_i)$ in Abhängigkeit einer Änderung des Verstärkungsgrades $\Delta F(t_{i-1})$ zu einem vorhergehenden Zeitpunkt t_{i-1} und dem Betrag der daraus resultierenden Last-Leistungsänderung $|\Delta P_A(t_i)|$ einstellen.

[0071] Um den Einfluß der Zelltemperatur T_Q auf die Kennlinie der Stromquelle 3 zu berücksichtigen, ist eine Korrekturereinrichtung 11 vorgesehen, welche die Temperatur T_Q erfaßt und ein elektrisches Korrektursignal an den Regler 9 liefert. Durch die Korrekturereinrichtung 11 ist es beispielsweise möglich, bei der Einstellung des Verstärkungsgrades F den Einfluß der Solarzelltemperatur T_Q auf die Strom-Spannungs-Kennlinie von Solarzellen zu berücksichtigen. Bekanntermaßen fällt mit ansteigender Solarzelltemperatur T_Q die von der Solarzelle 13 erzeugte Stromquellen-Leistung P_Q . Dies kann durch eine entsprechende Erhöhung des Verstärkungsgrades F kompensiert werden.

[0072] Da der Verstärker 5 seine Versorgungsspannung von der Stromquelle 3 bezieht, wird die vom Verstärker 5 aufgenommene Verstärker-Leistung P_V der Stromquelle 3 entnommen. Die Stromquelle 3 wird in Abhängigkeit vom Verstärkerausgangssignal U_A bzw. der Last-Leistung P_A belastet, und es entsteht eine Rückkopplung zwischen Last 2 bzw. Verstärker 5 und Stromquelle 3, die bei geeigneter Wahl des Verstärkungsfaktors F zu Schwingungen des Ausgangssignals U_A des Verstärkers 5 führt. Durch auftretende Resonanzeffekte entstehen am Verstärkerausgang Resonanzschwingungen, die bestimmte charakteristische Frequenzen aufweisen.

[0073] Die Fig. 7 zeigt ein Frequenzdiagramm einer typischen am Verstärkerausgang auftretenden Resonanzschwingung. Man erkennt deutlich das ausgeprägte Frequenzmaximum bei 4,7 kHz. Im Resonanzfall entnimmt dieses schwingende System der Quelle maximale Leistung, die als Last-Leistung P_A am Verbraucher 2 zur Verfügung steht. Ein weiteres Maximum der Schwingung am Verstärkerausgang liegt bei 12,3 kHz.

[0074] Da das Auftreten von Resonanzschwingungen am Verstärkerausgang einfach zu erfassen ist, kann die Maximierung der an der Last 2 auftretenden Last-Leistung P_A durch das Auswerten einer "scharfen" Kennlinie erfolgen. Eine aufwendige Ermittlung des Leistungsmaximums einer relativ flachen Leistungs-Kennlinie, wie sie nach dem Stand der Technik erfolgt, ist nicht erforderlich. Der Verstärkungsgrad F des Verstärkers 5 muß nur bei veränderten Stromquellenbedingungen oder einer wechselnden Last 2 nachgeführt werden, damit die Schwingungsbedingung des Oszillators weiter erfüllt ist.

[0075] Die Fig. 5 zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Vorrichtung, die eine symmetrische, bipolare Anordnung aufweist, wie sie in der Solartechnik oftmals verwendet wird.

[0076] Die Stromquelle 3 weist mehrere in Serie geschaltete Solarpanels 13 auf. Aufgrund der symmetrischen Anordnung der Solarpanels 13 steht eine positive/negative Ausgangsspannung von beispielsweise ± 6 V oder ± 12 V zur Verfügung. Um eine höhere Nennleistung zu erzielen, können weitere Solarpanels 13 parallel geschaltet werden.

[0077] Die Differenzereinrichtung 4 und der Verstärker 5 sind über eine entsprechende symmetrische Verkabelung mit der Stromquelle 3 verbunden und zur Verarbeitung von bipolaren Signalen geeignet. Durch die in der Solartechnik übliche symmetrische Anordnung der Komponenten kann ein hoher Wirkungsgrad mit hoher Ausbeute für das gesamte Photovoltaik-System erzielt werden.

[0078] Zwischen dem Ausgang des Verstärkers 5 und der Last 2 ist eine Gleichrichtereinrichtung 12 vorgesehen, die den Ausgangsstrom I_A bzw. die Ausgangsspannung U_A des Verstärkers 5 gleichrichtet. Auf diese Weise kann die Last 2 mit Gleichstrom bzw. Gleichspannung betrieben werden, was besonders zum Laden von Akkumulatoren bzw. Batterien vorteilhaft ist. Um sinusförmige Wechselströme zu erzeugen, kann auch eine Wechselrichtereinrichtung vorgesehen sein. Diese kann direkt mit dem Ausgang des Verstärkers 5 oder mit dem Ausgang der Gleichrichtereinrichtung 12 verbunden sein. Der erzeugte Wechselstrom kann auch über einen Lasttrafo in ein lokales und/oder öffentliches Netz eingespeist werden. Besonders vorteilhaft ist es, dazu einen dreiphasigen Wechselrichter vorzusehen.

[0079] In dem in Fig. 5 gezeigten Ausführungsbeispiel regelt der Regler 9 den Verstärkungsgrad F des Verstärkers 5. Dem Regler 9 wird dazu die von der Erfassungseinrichtung 10 ermittelte Stromquellen-Leistung P_Q oder eine andere damit korrelierte Größe zugeführt. Der Regler 9 kann beispielsweise als Maximalwertregler ausgebildet sein, der in Abhängigkeit von dem Verstärkungsgrad F einen Sollwert für die Regelung erzeugt. Ein Sollwertgenerator generiert anhand des Verstärkungsfaktors einen mit fortlaufender Zeit ansteigenden Sollwert, bis das Maximum der von der Stromquelle entnommenen Leistung P_Q erzielt wird.

[0080] Die Fig. 6a zeigt ein Ersatzschaltbild eines erfindungsgemäßen Solarmoduls für eine Lastbetrachtung zur Erläuterung des Funktionsprinzips. Die Stromquelle 3 wird dazu durch eine ideale Stromquelle mit eingepprägtem Strom I_Q und einem Innenwiderstand R_Q dargestellt. Am Ausgang der Stromquelle 3 tritt die Spannung $U_Q = I_Q \cdot R_Q$ auf.

[0081] Da die Leistungsaufnahme der Differenzereinrichtung 4 gegenüber der vom Verstärker aufgenommenen Lei-

stung P_V zu vernachlässigen ist, wird die Stromquelle 3 ausschließlich durch den Verstärker 5 belastet. Für die Stromquelle 3 stellt der Verstärker 5 in Abhängigkeit von der von ihm aufgenommenen Leistung P_V eine variable Last R_V dar. Auf der Ausgangsseite des Verstärkers 5 treten die Spannung U_A und der Strom I_A auf. Der Verstärker 5 wird durch die Last 2 mit einer Impedanz R_L belastet.

[0082] Da der Innenwiderstand R_Q der Stromquelle 3 in der Regel sehr viel größer als der Widerstand R_V des Verstärkers ist, gilt näherungsweise:

$$P_V = I_Q^2 \cdot R_V.$$

Auf der Verstärkerausgangsseite ergibt sich

$$P_A = U_A \cdot I_A = \frac{U_A^2}{R_L}$$

für die Last-Leistung. Unter der Annahme eines verlustlos arbeitenden Verstärkers mit 100 % Wirkungsgrad gilt:

$$P_A = P_V.$$

[0083] Somit kann der Widerstand R_V des Verstärkers bestimmt werden:

$$R_V = \frac{U_A^2}{I_Q^2 \cdot R_L}.$$

[0084] Die Fig. 6b zeigt ein Ersatzschaltbild eines erfindungsgemäßen Solarmoduls für eine Signalbetrachtung. Zum Zwecke einer einfachen Erläuterung wird der Verstärker 5 als beschalteter Operationsverstärker (U-U-Wandler) dargestellt. Der Verstärkungsfaktor des Verstärkers 5 gemäß dieser Beschaltung zu F ist

$$F = \frac{U_A}{U_V}.$$

[0085] Die am Eingang der Vorrichtung anliegende Stromquellen-Spannung U_Q wird von der Differenziereinrichtung 4 zweimal nach der Zeit t differenziert. Am Eingang des Verstärkers 5 liegt demnach die Spannung

$$U_V = \frac{d^2 U_Q}{dt^2}$$

an. Am Verstärkerausgang ergibt sich die Spannung $U_A = F \cdot U_V$.

[0086] Unter Berücksichtigung des durch die Leistungsbetrachtung gewonnenen Ausdrucks für R_V gilt:

$$U_Q = \frac{U_A^2}{I_Q \cdot R_L}.$$

[0087] Für die Spannung am Verstärkereingang ergibt sich:

$$U_V = \frac{d^2}{dt^2} \left[\frac{U_A^2}{I_Q \cdot R_L} \right] = \frac{2}{I_Q \cdot R_L} \left[(\dot{U}_A)^2 + U_A \cdot \ddot{U}_A \right].$$

[0088] Unter Berücksichtigung des Zusammenhangs zwischen Verstärkereingangsspannung U_v und Verstärkerausgangsspannung U_A wird folgende Differentialgleichung zweiter Ordnung erhalten:

$$U_A(t) = \frac{2 \cdot A}{I_Q R_L} \left[\left(\dot{U}_A(t) \right)^2 + U_A(t) \cdot \ddot{U}_A(t) \right] .$$

[0089] Diese nichtlineare Differentialgleichung zweiter Ordnung für die Spannung $U_A(t)$ am Ausgang des Verstärkers beschreibt ein schwingungsfähiges System bestehend aus Stromquelle 3, Differenziereinrichtung 4, Verstärker 5 und Last 2. Die Lösungen der Differentialgleichung entsprechen komplexen Schwingungen. Mit Eintritt der Schwingungsbedingung treten Resonanzeffekte auf, die zu Resonanzschwingungen der Verstärkerausgangsspannung U_A führen. Im Resonanzfall wird der Stromquelle 3 maximale Leistung P_Q entnommen und der Last zugeführt.

[0090] Die Resonanzfrequenzen der Schwingung der Ausgangsspannung U_A des Verstärkers sind in dem Frequenzdiagramm der Fig. 7 dargestellt. Man kann deutlich das ausgeprägte Maximum der Ausgangsspannung U_A bei einer Frequenz von ca. 4,7 kHz erkennen.

[0091] Fig. 8 zeigt eine schematische Darstellung einer Verstärkungsregelung, die automatisch eine derartige Einstellung des Verstärkungsgrades F ermöglicht, um eine Oszillation am Verstärkerausgang zu erzielen.

[0092] Zur Anpassung des Arbeitsbereichs kann der erfaßte Istwert X , beispielsweise die Spannung U_A bzw. die Leistung P_A , gegebenenfalls nach einer Glättung bzw. Mittelung, fakultativ von einer Normierungseinrichtung 14 normiert bzw. skaliert werden.

[0093] Ein Maximum-Regler 15 ermittelt einen Stellwert Y für die Einstellung des Verstärkungsgrades F des Verstärkers 5, wobei eine mit dem Istwert korrelierte Zielgröße, z.B. die Lastleistung P_A , maximiert werden soll. Der Maximum-Regler 15 speichert dazu zum Zeitpunkt t den aktuellen Istwert X und den Stellwert Y . Zum Zeitpunkt $t+1$ wird der Stellwert Y um den Wert dY erhöht. Durch diese Änderung des Stellwerts wird der Verstärkungsgrad um dF verändert, wodurch sich auch die Spannung U_A bzw. die Leistung P_A ändert.

[0094] Falls der Istwert X' zum Zeitpunkt $t+1$ kleiner als der Istwert X zum vorangegangenen Zeitpunkt t ist, wurde der Stellwert in die falsche Richtung verändert. Zum nächsten Zeitpunkt $t+2$ wird der Stellwert dann um den Wert $2 \cdot dY$ verringert.

[0095] Falls der Istwert X' zum Zeitpunkt $t+1$ größer wird oder gleich bleibt, kann die Änderung wiederholt werden. Zum nächsten Zeitpunkt $t+2$ wird der Stellwert ein weiteres Mal um den Wert dY erhöht.

[0096] Diese Verfahrensweise wird vom Maximum-Regler 15 ständig wiederholt. Auf diese Weise kann die Ausgangsspannung U_A bzw. die Leistung P_A laufend maximiert werden.

[0097] Über eine fakultative Kennlinienanpassungseinrichtung 16 kann der berechnete Stellwert Y an die Verstärkungskennlinie des Verstärkers 5 (Verstärkungen V_i) angepaßt werden. Dies geschieht zweckmäßigerweise durch eine stückweise lineare Anpassungskennlinie, die z.B. durch Stützpunktpaare (Y_i, V_i) beschrieben wird.

Beispiel 1

[0098] Fig. 9 zeigt eine schematische Darstellung eines Versuchsaufbaus zur Untersuchung des Leistungsverhaltens einer erfindungsgemäßen Vorrichtung 1. Ziel der Versuche war es, einen Gewinn in der von einem Lastwiderstand 2 aufgenommenen Last-Leistung P_A durch die Impedanzanpassung mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung 1 nachzuweisen.

[0099] Dazu wurden insgesamt sechs identische Solarpanels 13 gleich zur Sonne ausgerichtet. Jeweils zwei Panels wurden zusammengefaßt, so daß drei Panelpaare zur Messung zur Verfügung standen. Die ersten beiden Panelpaare (Kanäle a und b) wurden über die Schalter 17a, 17b mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung 1 verbunden. Die Vorrichtung 1 wies zwei unabhängige Kanäle auf, an deren jeweiligen Ausgängen sich Lastwiderstände 2a, 2b befanden. Als Referenz für die qualitative Vergleichsmessung wurde das dritte Solarpanelpaar über einen Schalter 17c mit einem Lastwiderstand 2c verbunden (Kanal c).

[0100] Um Fehler durch fertigungsbedingte Bauteilunterschiede auszuschließen, wurden in Vorversuchen alle Paarungen der Bauteile untersucht. Durch diese Messungen wurde festgestellt, daß der maximale Fehler durch Bauteilunterschiede weniger als 1 % beträgt.

[0101] Zur Messung der Lastleistung P_A , die von den jeweiligen Lastwiderständen 2a, 2b, 2c aufgenommen wurde, erfolgte eine kalorimetrische Messung durch Aufzeichnen des Temperaturverlaufs der auf jeweils einem Aluminiumblock als Kühlkörper angeordneten Lastwiderständen 2a, 2b, 2c durchgeführt. In jedem Kühlkörper war dazu in einer zentralen Bohrung jeweils ein Temperatursensor 18a, b, c angeordnet, der die Temperatur T_a , T_b , T_c des Lastwider-

stands 2a, b, c erfaßte. Die Daten der Temperatursensoren 18a, 18b, 18c wurden von einer Meßvorrichtung 19 aufgezeichnet. Zusätzlich wurden die Spannungen und Ströme der Lastwiderstände 2a, 2b, 2c erfaßt und aufgezeichnet.

[0102] Bei Beginn der Messung wurden die Schalter 17a, 17b, 17c gleichzeitig eingeschaltet. Für jeden Kanal a, b, c wurden Strom und Spannung sowie die Temperatur des Kühlkörpers für die einzelnen Meßintervalle erfaßt und aufgezeichnet.

[0103] Die Fig. 10 zeigt den Verlauf der Stromstärke, der Spannung und der Temperatur für die Kanäle a, b, c. Strom und Spannung der Kanäle a, b, deren Lasten 2a, 2b über die erfindungsgemäße Vorrichtung 1 an die zeitlich wechselnden Quellen-Leistungen P_Q ihrer Solarpanels angepaßt wurden, waren deutlich größer als Strom und Spannung des Referenzkanals c. Die größere Last-Leistung der Kanäle a, b zeigt sich auch im Temperaturverlauf der Kühlkörper der Lastwiderstände 2a, 2b. Die Temperaturen dieser Kühlkörper stiegen im Verlauf der Messung gegenüber der Temperatur des Kühlkörpers des Lastwiderstands 2c deutlich an.

Beispiel 2

[0104] In Fig. 11 sind weitere experimentelle Ergebnisse graphisch dargestellt. Die obere Grafik zeigt den Verlauf der erfaßten Last-Leistung mit und ohne erfindungsgemäße Vorrichtung (MPP-Regler) für vier Zeitbereiche (Bereiche 1, 2, 3 und 4). Die untere Grafik zeigt das Verhältnis der Last-Leistung mit Vorrichtung zur Last-Leistung des Referenzkanals. Dieses Leistungsverhältnis ist für weite Bereiche der Messung größer eins, was einen Leistungsgewinn durch die erfindungsgemäße Vorrichtung bedeutet.

[0105] Der größte Gewinn wurde in Bereich 1 der Messung erzielt. In diesem Zeitabschnitt wurde die Sonne von einer Wolke verdeckt, wodurch nur eine geringe Quellen-Leistung zur Verfügung stand. In diesem Bereich wurde die Last durch die Vorrichtung an den gestiegenen Innenwiderstand der Quelle angepaßt und so die Leistungsentnahme optimiert. Die Last-Leistung mit Vorrichtung 1 ist deutlich größer als ohne.

[0106] Im Bereich 2 änderte sich die Bestrahlungsstärke der Solarpanels. Durch die Einstelleinrichtung 8 wurde der Verstärkungsgrad F des Verstärkers 5 geregelt, um die Schwingungsbedingung des Oszillationssystems den veränderten Beleuchtungsbedingungen anzupassen. Beide Leistungen schwankten in diesem Bereich stark.

[0107] Im Bereich 3 wurde die Sonne wiederum von einer Wolke verdeckt. Die Leistung am direkt an die Solarpanels angeschlossenen Lastwiderstand brach aufgrund der Fehlanpassung an die veränderte Quellenimpedanz zusammen, während die erfindungsgemäße Vorrichtung eine Anpassung an die veränderten Quellenparameter vornahm.

[0108] Im Bereich 4 mit direkter Sonneneinstrahlung schwankte die Quellenleistung relativ stark. Die Leistungen mit und ohne erfindungsgemäße Vorrichtung sind in diesem Bereich ungefähr gleich. Am Ende der Meßdauer wurde die Sonne wieder von Wolken verdeckt, und die erfindungsgemäße Impedanzanpassung führte zu einem erneuten Leistungsgewinn, wie die untere Grafik im Bereich 4 zeigt.

[0109] Die Experimente der Beispiele 1 und 2 zeigen einen deutlichen Leistungsgewinn durch die erfindungsgemäße Vorrichtung. Besonders in Bereichen, in denen die Bestrahlung der Solarpanels von den optimalen Bedingungen, für welche die Solaranlage ausgelegt wurde, abweicht, kann die Vorrichtung trotz Fehlanpassung der Quelle maximale Leistung entnehmen und dem Lastwiderstand zuführen. Dies entspricht einer laufenden adaptiven Anpassung der Last an die Quelle unter Leistungsgewinn.

Bezugszeichenliste

[0110]

- 1 Vorrichtung bzw. MPP-Regler
- 2 Last (elektrische)
- 3 Stromquelle
- 4 Differenziereinrichtung
- 5 Verstärker
- 6 Vergleicher
- 7 Filtereinrichtung
- 8 Einstelleinrichtung
- 9 Regler
- 10 Erfassungseinrichtung
- 11 Korrektoreinrichtung
- 12 Gleichrichtereinrichtung
- 13 Solarzellen (photovoltaische Zellen)
- 14 Normierungseinrichtung
- 15 Maximum-Regler

16 Kennlinienanpassungseinrichtung

U_Q Spannung der Stromquelle 3
 I_Q im Stromquellenkreis fließender Strom
 P_Q Stromquellen-Leistung
 U_A Ausgangsspannung des Verstärkers 5
 I_A durch die Last 2 fließender Strom
 P_A von der Last 2 aufgenommene Last-Leistung
 P_V Verstärker-Leistung
 F Verstärkungsgrad des Verstärkers 5
 T_Q Stromquellen-Temperatur

Patentansprüche

1. Vorrichtung (1) zur Anpassung einer elektrischen Last (2) an eine Stromquelle (3) mit gegebenenfalls wechselnder Stromquellen-Leistung (P_Q), um der Stromquelle (3) maximale Last-Leistung (P_A) über die Last (2) zu entnehmen, die aufweist:

eine Differenziereinrichtung (4), die ein Ausgangssignal (I_Q , U_Q) der Stromquelle (3) nach der Zeit (t) differenziert und ein der ersten Ableitung (dU_Q/dt , dI_Q/dt) oder der zweiten Ableitung (d^2U_Q/dt^2 , d^2I_Q/dt^2) entsprechendes Ausgangssignal liefert,
 und
 einen der Differenziereinrichtung (4) nachgeschalteten Verstärker (5), an dessen Ausgang die Last (2) anliegt und der das Ausgangssignal der Differenziereinrichtung (4) verstärkt,

wobei der Verstärker (5) derart mit der Stromquelle (3) verbunden ist, daß die vom Verstärker (5) aufgenommene Verstärker-Leistung (P_V) der Stromquelle (3) entnommen wird, und das Ausgangssignal (U_A , I_A) des Verstärkers (5) Schwingungen, insbesondere Resonanzschwingungen, aufweist.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, daß** eine Filtereinrichtung (7), insbesondere ein Bandpaßfilter, zwischen dem Ausgang der Differenziereinrichtung (4) und dem Eingang des Verstärkers (5) vorgesehen ist, die das Ausgangssignal des Verstärkers (5) nach einer vorgegebenen Durchlaßcharakteristik filtert.

3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, daß** sie eine Einstelleinrichtung (8) für den Verstärkungsgrad (F) des Verstärkers (5) aufweist, die auf den Verstärker (5) wirkt.

4. Vorrichtung nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, daß** der Verstärker (5) ein Operationsverstärker ist.

5. Vorrichtung nach Anspruch 3 oder 4, **dadurch gekennzeichnet, daß** die Einstelleinrichtung (8) eine Erfassungseinrichtung (10) aufweist, welche die von der Stromquelle (3) abgegebene Stromquellen-Leistung (P_Q) und/oder die von der Last (2) aufgenommene Last-Leistung (P_A) und/oder eine mit diesen Leistungen korrelierte elektrische Größe (U_A , I_A ; U_Q , I_Q) erfaßt.

6. MPP-Regler, **gekennzeichnet durch** eine Vorrichtung nach Anspruch 5, bei der die Einstelleinrichtung (8) einen Regler (9) aufweist, der die Ausgangssignale der Erfassungseinrichtung (10) als solche oder nach Signalverarbeitung als Istwerte erfaßt und den Verstärkungsgrad (F) des Verstärkers (5) regelt.

7. MPP-Regler nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet, daß** der Regler (9) so ausgebildet ist, daß er den Verstärkungsgrad (F) des Verstärkers (5) so regelt, daß die Last-Leistung (P_A) maximiert wird.

8. MPP-Regler nach Anspruch 6 oder 7, **dadurch gekennzeichnet, daß** der Regler (9) einen Sollwertgenerator aufweist, der in Abhängigkeit von einem Stellwert des Reglers (9), insbesondere dem Verstärkungsgrad (F) des Verstärkers (5), einen Sollwert für die Regelung erzeugt.

9. MPP-Regler Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet, daß** der Sollwertgenerator, solange der Stellwert eine vorgegebene Bedingung erfüllt, einen zeitlich ansteigenden Sollwert erzeugt und anderenfalls, wenn der Stellwert die

Bedingung nicht erfüllt, einen zeitlich abfallenden Sollwert erzeugt.

- 5 10. MPP-Regler nach einem oder mehreren der Ansprüche 6 bis 9, **dadurch gekennzeichnet, daß** die Einstelleinrichtung (8) einen Vergleichler (6) aufweist, der zu vorgegebenen Zeitpunkten den Wert einer oder mehrerer der von der Erfassungseinrichtung (10) erfaßten Größen (P_Q , P_A ; U_Q , I_Q ; U_A , I_A) mit dem Wert der betreffenden Größe zum vorhergehenden Zeitpunkt vergleicht und den jeweiligen Differenzwert dem Regler (9) zuführt, der je nach Art der erfaßten Größe den Verstärkungsgrad (F) des Verstärkers (5) anhand des Differenzwerts so steuert, daß die Last-Leistung (P_A) bzw. die Stromquellen-Leistung (P_Q) maximiert wird.
- 10 11. MPP-Regler nach einem oder mehreren der Ansprüche 6 bis 10, **dadurch gekennzeichnet, daß** der Regler (9) den Verstärkungsgrad (F) des Verstärkers (5) erhöht, wenn der Wert der von der Erfassungseinrichtung (10) erfaßten Größe oder das Ausgangssignal des Vergleichlers (6) ansteigt und den Verstärkungsgrad (F) des Verstärkers (5) verringert, wenn die entsprechende Größe abfällt.
- 15 12. MPP-Regler nach Anspruch 10 oder 11, **dadurch gekennzeichnet, daß** der Regler (9) den Verstärkungsgrad (F) des Verstärkers (5) in Abhängigkeit einer Änderung des Verstärkungsgrads (F) zu einem vorhergehenden Zeitpunkt und dem Betrag der daraus resultierenden Änderung der Stromquellen-Leistung (P_Q) und/ oder der Last-Leistung (P_A) ändert.
- 20 13. MPP-Regler nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet, daß** der Regler (9) den Verstärkungsgrad (F) des Verstärkers (5) erhöht, wenn der Verstärkungsgrad (F) bei der vorhergehenden Änderung erhöht wurde und vom Vergleichler (6) eine positive Änderung der Stromquellen-Leistung (P_Q) und/ oder der Last-Leistung (P_A) ermittelt wird, oder wenn der Verstärkungsgrad (F) bei der vorhergehenden Änderung verringert wurde und vom Vergleichler (6) eine negative Änderung der Stromquellen-Leistung (P_Q) und/oder der Last-Leistung (P_A) ermittelt wird, daß
25 der Regler (9) den Verstärkungsgrad (F) des Verstärkers (5) verringert, wenn der Verstärkungsgrad (F) bei der vorhergehenden Änderung erhöht wurde und vom Vergleichler (6) eine negative Änderung der Stromquellen-Leistung (P_Q) und/oder der Last-Leistung (P_A) ermittelt wird, oder wenn der Verstärkungsgrad (F) bei der vorhergehenden Änderung verringert wurde und vom Vergleichler (6) eine positive Änderung der Stromquellen-Leistung (P_Q) und/oder der Last-Leistung (P_A) ermittelt wird.
- 30 14. MPP-Regler nach einem oder mehreren der Ansprüche 6 bis 13, **dadurch gekennzeichnet, daß** die Einstelleinrichtung (8) eine Optimierungseinrichtung aufweist, die ein Optimierungsverfahren, insbesondere ein Gradientenverfahren, ausführt, um das Maximum der von der Stromquelle (3) abgegebenen Stromquellen-Leistung (P_Q) und/ oder der von der Last (2) aufgenommenen Last-Leistung (P_A) zu ermitteln und den Verstärkungsgrad (F) des Verstärkers (5) entsprechend zu steuern.
- 35 15. Vorrichtung oder MPP-Regler nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 14, **dadurch gekennzeichnet, daß** der Arbeitspunkt des Verstärkers (5) in einem nichtlinearen Bereich seiner Verstärkungskennlinie liegt.
- 40 16. Vorrichtung oder MPP-Regler nach einem oder mehreren der Ansprüche 3 bis 15, **dadurch gekennzeichnet, daß** die Einstelleinrichtung (8) eine Korrekturereinrichtung (11) aufweist, die eine parametrische Größe der Stromquelle (3), insbesondere die Stromquellen-Temperatur (T_Q) der Stromquelle (3), erfaßt und in Form eines elektrischen Korrektursignals an den Regler (9) liefert, der ein entsprechend korrigiertes Ausgangssignal bzw. Stellsignal zur Steuerung des Verstärkungsgrades (F) des Verstärkers (5) abgibt.
- 45 17. Vorrichtung oder MPP-Regler nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 16, **dadurch gekennzeichnet, daß** zwischen dem Ausgang des Verstärkers (5) und der Last (2) eine Gleichrichtereinrichtung (12) und/oder eine Wechselrichtereinrichtung vorgesehen ist.
- 50 18. Vorrichtung oder MPP-Regler nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 17, **dadurch gekennzeichnet, daß** der Verstärker (5) ein analoger oder digitaler Verstärker einer der Klassen A bis T oder ein adaptiver Power-MOS-FET-Verstärker ist.
- 55 19. Solarmodul, der als Stromquelle (3) eine oder mehrere photovoltaische Zellen (Solarzellen) (13) zur Erzeugung von elektrischer Leistung sowie eine Vorrichtung oder einen MPP-Regler (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 18 aufweist.
20. Verfahren zur Anpassung einer elektrischen Last (2) an eine Stromquelle (3) mit gegebenenfalls wechselnder

Stromquellen-Leistung (P_Q), um der Stromquelle (3) maximale Last-Leistung (P_A) über die Last (2) zu entnehmen, das folgende Schritte umfaßt:

- (I) Erfassen eines Ausgangssignals (U_Q , I_Q) der Stromquelle (3) oder einer damit korrelierten elektrischen Größe,
- (II) Erzeugen der ersten Ableitung (dU_Q/dt , dI_Q/dt) des in (I) erfaßten Signals und gegebenenfalls der zweiten Ableitung (d^2U_Q/dt^2 , d^2I_Q/dt^2),
- (III) Verstärken des erhaltenen Ableitungssignals unter Erhalt eines verstärkten Ausgangssignals (U_A , I_A) und
- (IV) Anlegen des erhaltenen verstärkten Ausgangssignals (U_A , I_A) an die Last (2),

wobei die zum Verstärken in Schritt (III) beim verwendeten Verstärker (5) erforderliche elektrische Verstärker-Leistung (P_V) der Stromquelle (3) entnommen wird, so daß das verstärkte Ausgangssignal (U_A , I_A) Schwingungen, insbesondere Resonanzschwingungen, aufweist.

- 21. Verfahren nach Anspruch 20, **dadurch gekennzeichnet, daß** zum Verstärken in Schritt (III) ein Verstärker (5) verwendet wird, dessen aufgenommene elektrische Verstärker-Leistung (P_V) nicht konstant ist, sondern von der Größe des verstärkten Ausgangssignals (U_A , I_A) und/ oder von der in Schritt (IV) von der Last (2) aufgenommenen Last-Leistung (P_A) abhängt.
- 22. Verfahren nach Anspruch 20 oder 21, **dadurch gekennzeichnet, daß** nach Schritt (II) und vor Schritt (III) das Ableitungssignal gefiltert wird, insbesondere durch ein Bandpaßfilter.
- 23. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 20 bis 22, **dadurch gekennzeichnet, daß** das Verstärken in Schritt (III) unter Einstellung des Verstärkungsgrades (F) des Verstärkers (5) vorgenommen wird.
- 24. Verfahren nach Anspruch 23, **dadurch gekennzeichnet, daß** der Verstärkungsgrad (F) in Schritt (III) so eingestellt wird, daß die von der Last (2) aufgenommene Last-Leistung (P_A) maximiert wird.
- 25. Verfahren nach Anspruch 24, **dadurch gekennzeichnet, daß** der Verstärkungsgrad (F) durch einen Regler eingestellt wird.
- 26. Verfahren nach Anspruch 25, **dadurch gekennzeichnet, daß** in Abhängigkeit von einem Stellwert des Reglers, insbesondere dem Verstärkungsgrad (F), ein Sollwert für die Regelung erzeugt wird.
- 27. Verfahren nach Anspruch 26, **dadurch gekennzeichnet, daß**, solange der Stellwert eine vorgegebene Bedingung erfüllt, ein zeitlich ansteigender Sollwert erzeugt wird und anderenfalls, wenn der Stellwert die Bedingung nicht erfüllt, ein zeitlich abfallender Sollwert erzeugt wird.
- 28. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 23 bis 27, **dadurch gekennzeichnet, daß** in Schritt (III) zu vorgegebenen Zeitpunkten der Wert einer oder mehrerer der Größen P_Q , P_A , U_Q , I_Q , U_A , I_A mit dem Wert der betreffenden Größe zum vorhergehenden Zeitpunkt verglichen und der jeweilige Differenzwert gebildet wird, mit dem der Verstärkungsgrad (F) des Verstärkers (5) so gesteuert wird, daß die Last-Leistung (P_A) bzw. die Stromquellen-Leistung (P_Q) maximiert wird.
- 29. Verfahren nach Anspruch 28, **dadurch gekennzeichnet, daß** der Verstärkungsgrad (F) des Verstärkers (5) in Abhängigkeit von einer Änderung des Verstärkungsgrads (F) zu einem vorhergehenden Zeitpunkt und dem Betrag der daraus resultierenden Änderung der Stromquellen-Leistung (P_Q) und/oder der Last-Leistung (P_A) geändert wird.
- 30. Verfahren nach Anspruch 28 oder 29, **dadurch gekennzeichnet, daß** in Schritt (III) ein Optimierungsverfahren, insbesondere ein Gradientenverfahren, angewandt wird, um durch Einstellung des Verstärkungsgrades (F) des Verstärkers (5) die von der Last (2) aufgenommene Last-Leistung (P_A) bzw. die Stromquellen-Leistung (P_Q) zu maximieren.
- 31. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 23 bis 30, **dadurch gekennzeichnet, daß** in Schritt (III) der Verstärkungsgrad (F) des Verstärkers (5) in Abhängigkeit von einem erfaßten Parameterwert der Stromquelle (3), insbesondere der Stromquellen-Temperatur (T_Q), eingestellt wird.

32. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 23 bis 31, **dadurch gekennzeichnet, daß** in Schritt (III) der Verstärkungsgrad (F) des Verstärkers (5) so eingestellt wird, daß der Arbeitspunkt in einem nichtlinearen Bereich seiner Verstärkungskennlinie liegt.

33. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 20 bis 32, **dadurch gekennzeichnet, daß** in Schritt (IV) das verstärkte Ausgangssignal (U_A , I_A) an eine ohmsche Last, eine Batterie bzw. einen Akkumulator, ein Ladegerät, einen Gleichrichter, einen Wechselrichter, einen Transformator oder einen anderen elektrischen Wandler als Last (2) angelegt wird.

34. Anwendung des Verfahrens nach einem oder mehreren der Ansprüche 20 bis 33 zur Steuerung oder Regelung von photovoltaischen Anlagen, insbesondere von Solarzellen und Solarpanels sowie Anordnungen daraus.

35. Anwendung des Verfahrens nach einem oder mehreren der Ansprüche 20 bis 33 zur Steuerung oder Regelung von photovoltaischen Anlagen, insbesondere von Solarzellen und Solarpanels sowie Anordnungen daraus, deren Last (2) eine ohmsche Last, eine Batterie bzw. ein Akkumulator, ein Ladegerät, ein Gleichrichter, ein Wechselrichter, ein Transformator und/ oder ein anderer elektrischer Wandler ist.

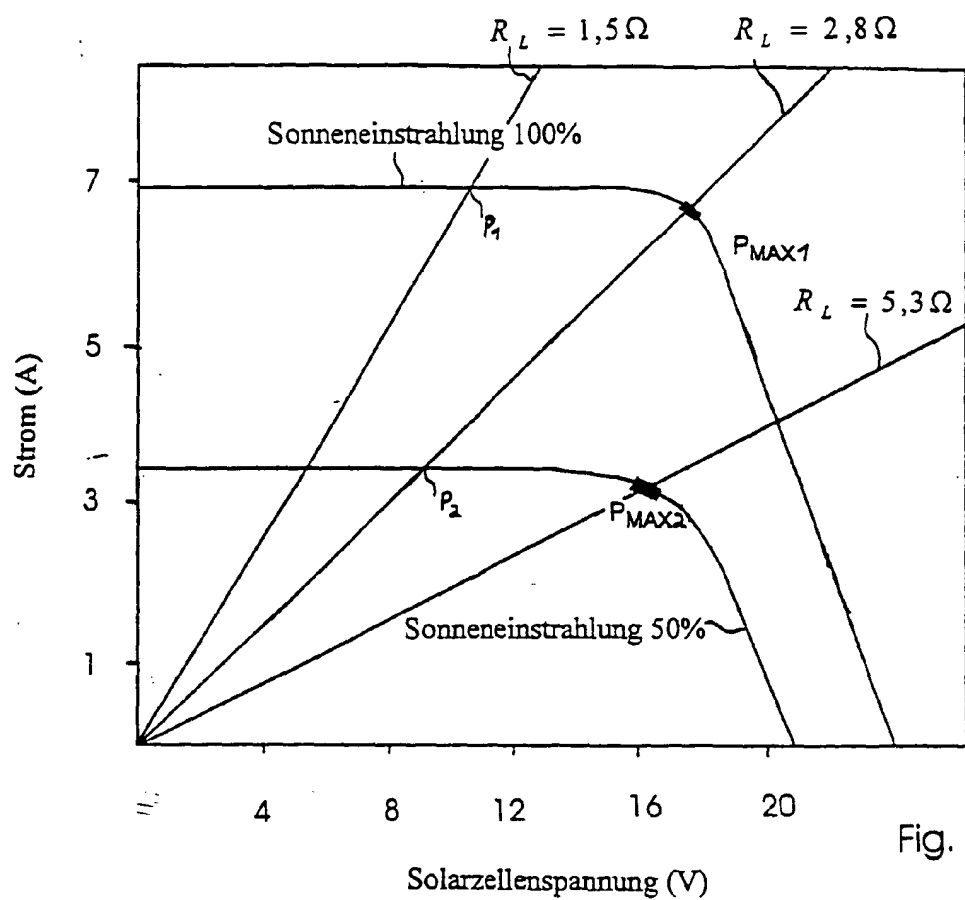


Fig. 1

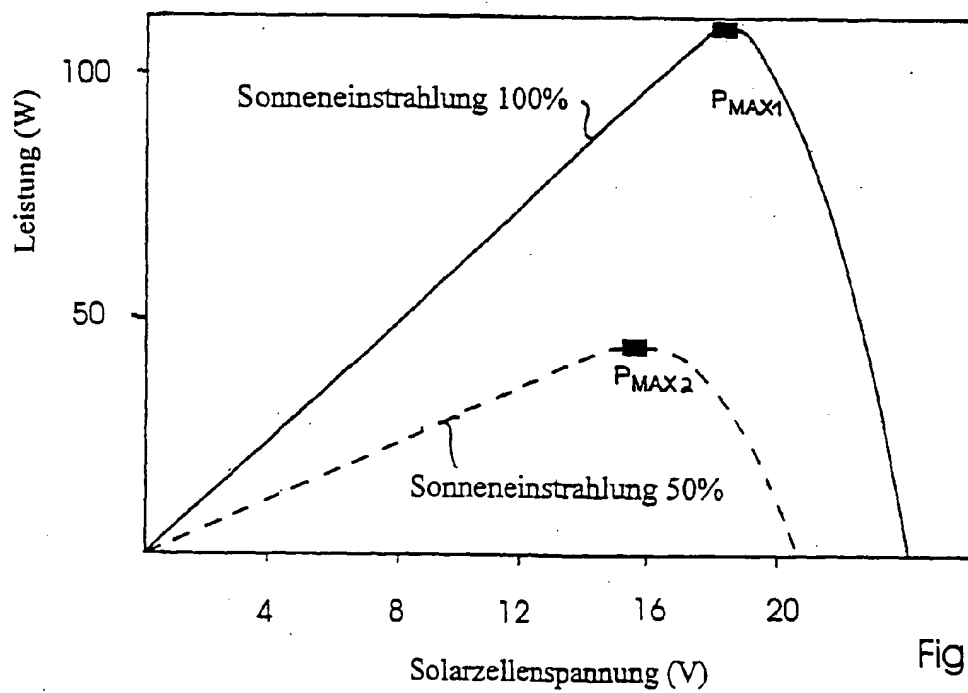


Fig. 2

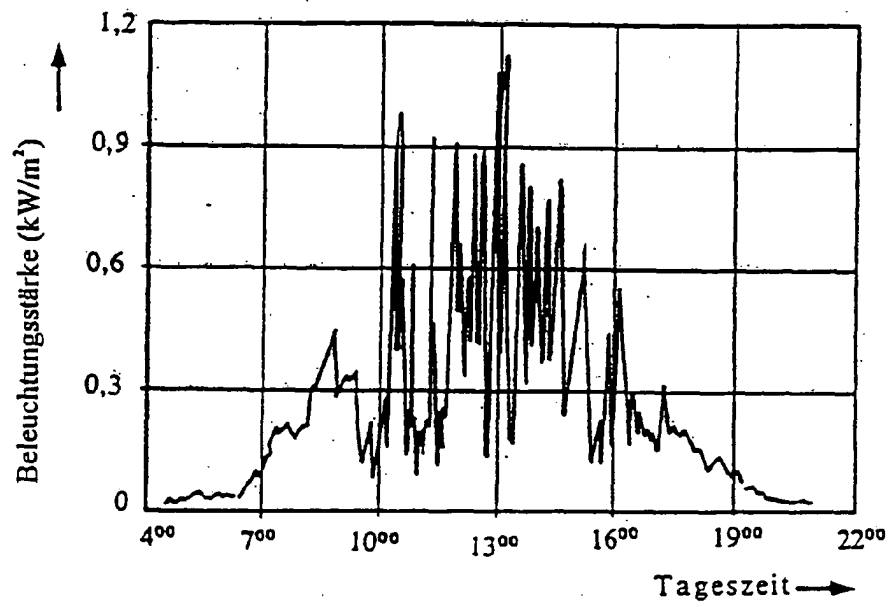


Fig. 3

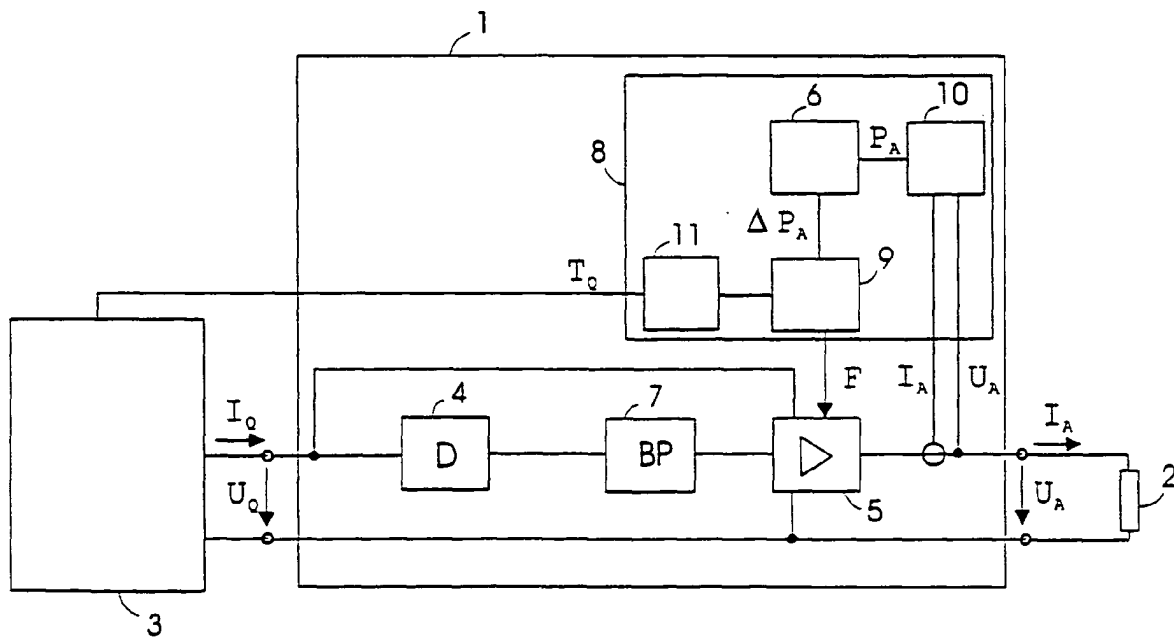


Fig. 4

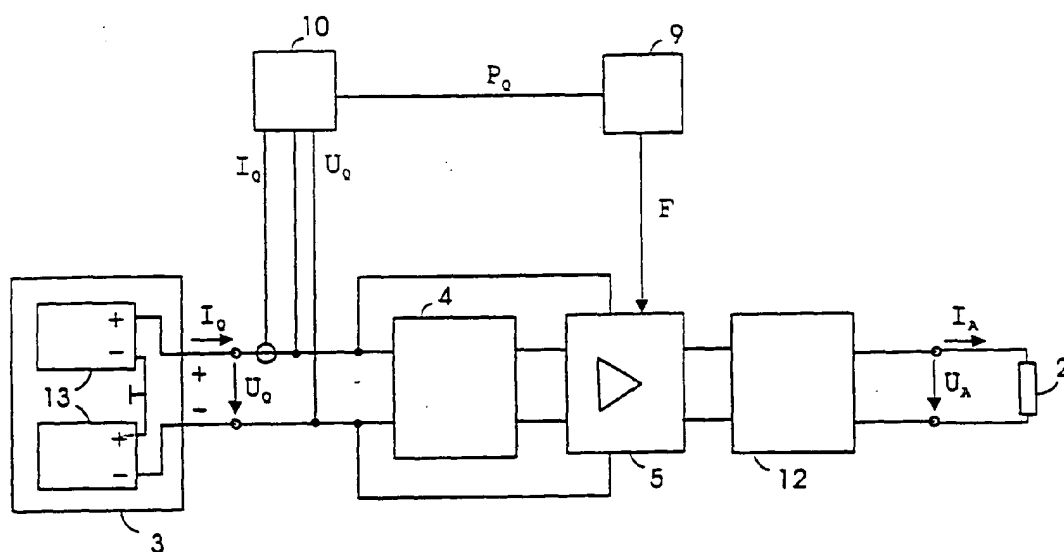


Fig. 5

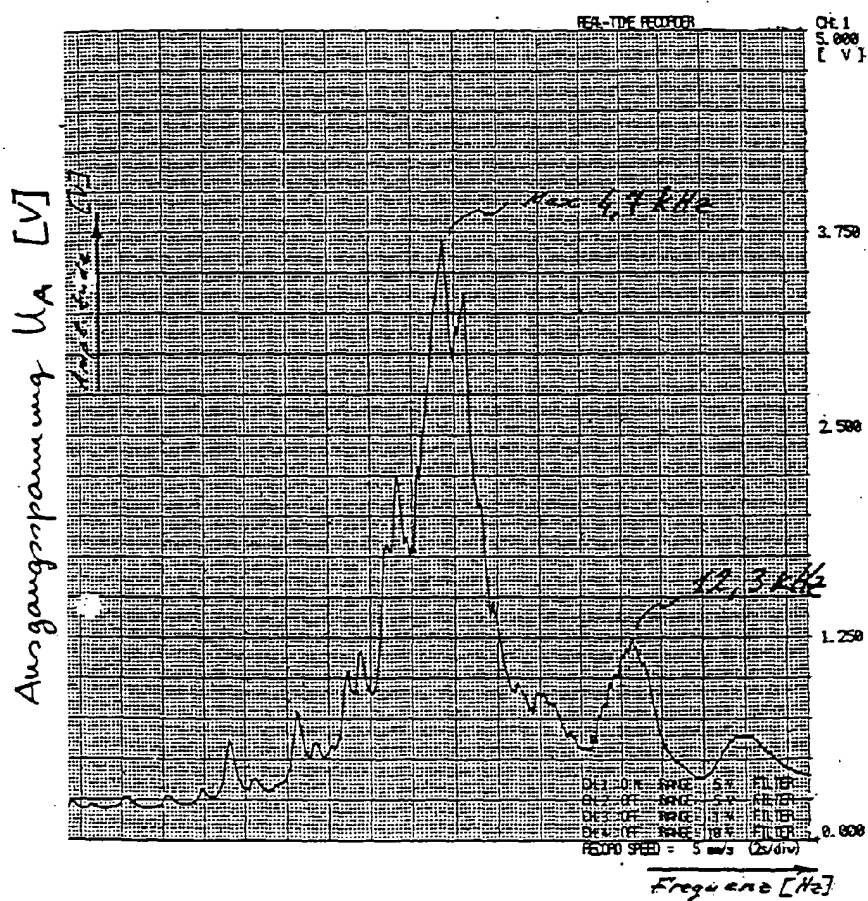


Fig. 7

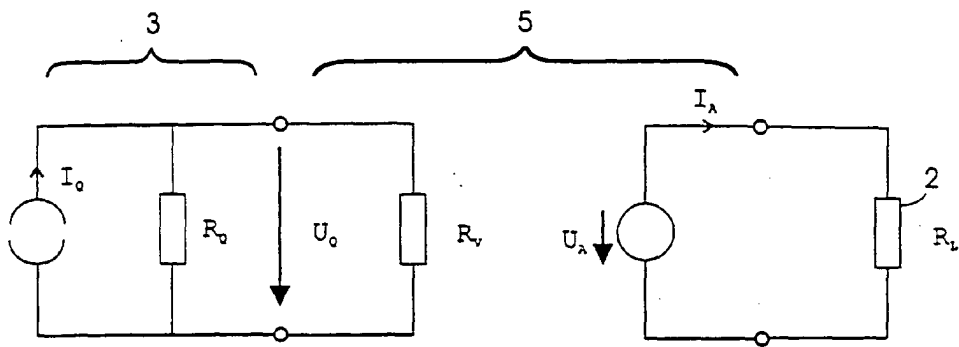


Fig. 6a

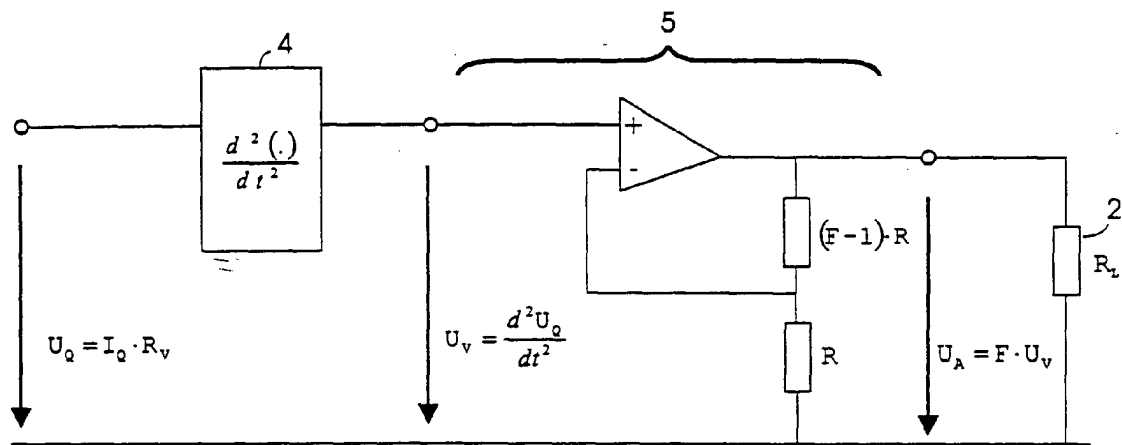


Fig. 6b

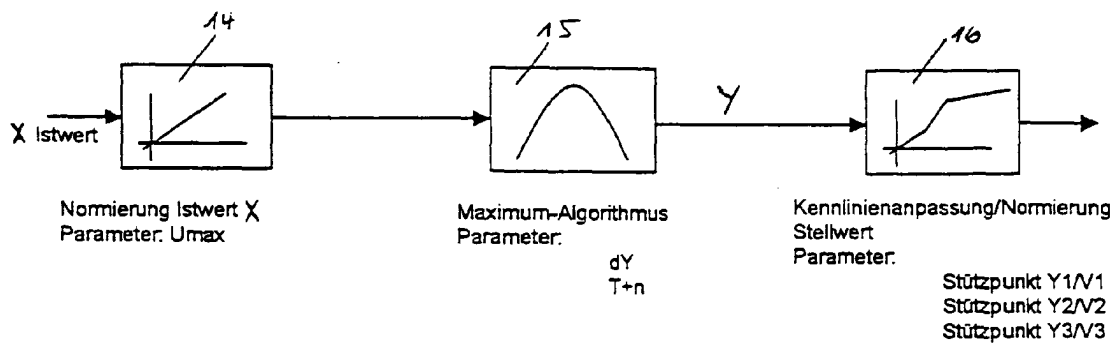


Fig. 8

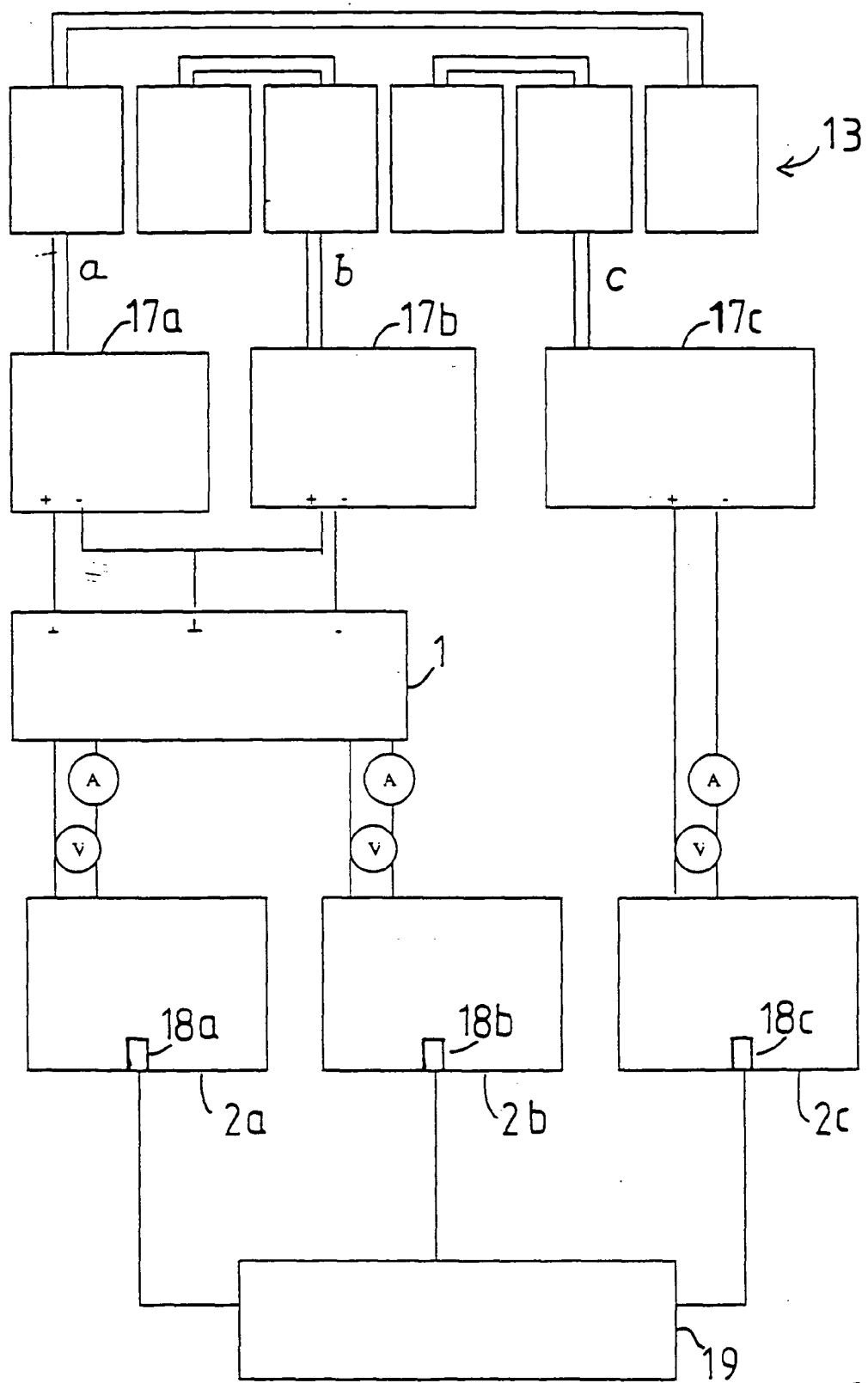


Fig. 9

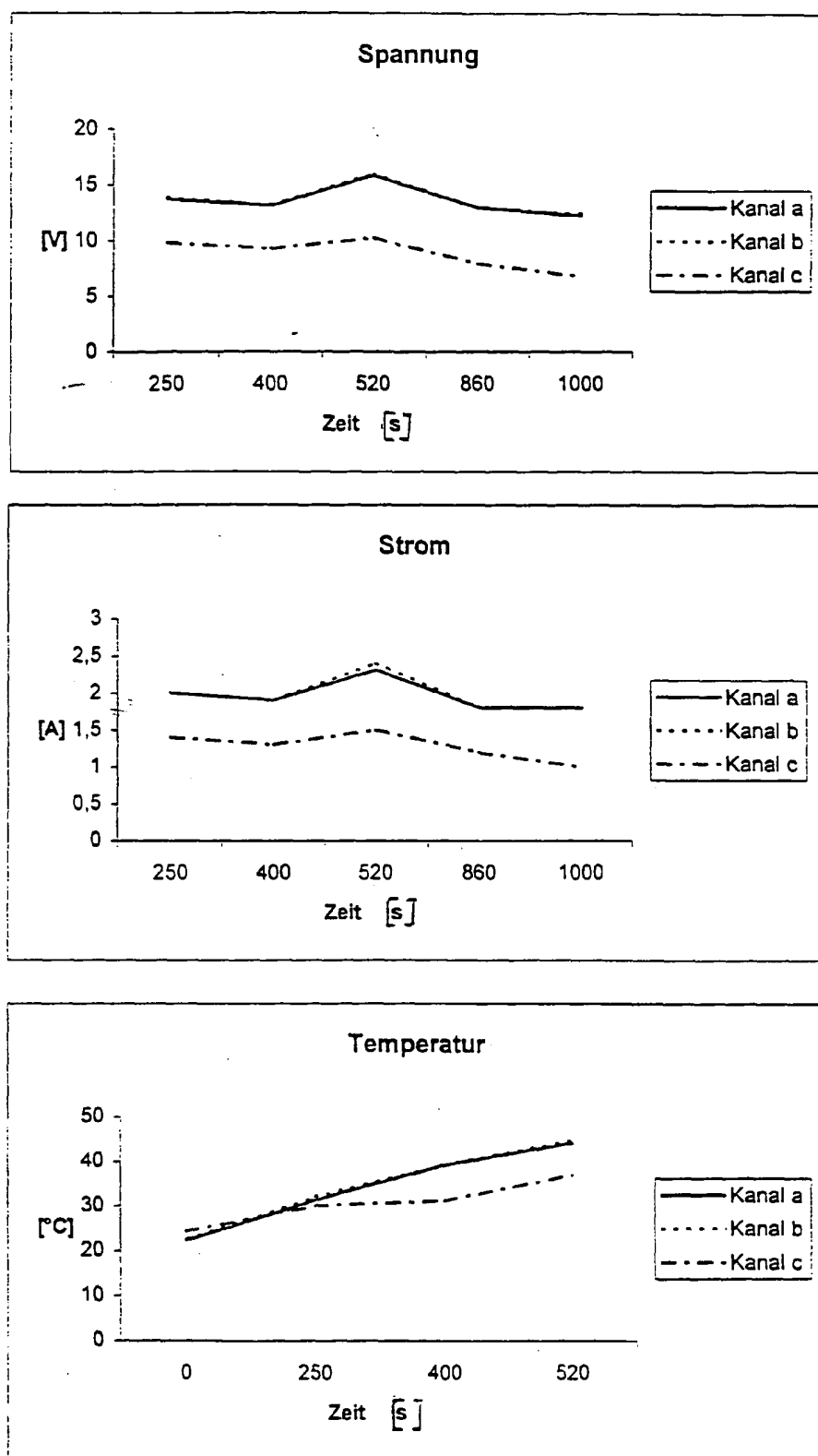


Fig. 10

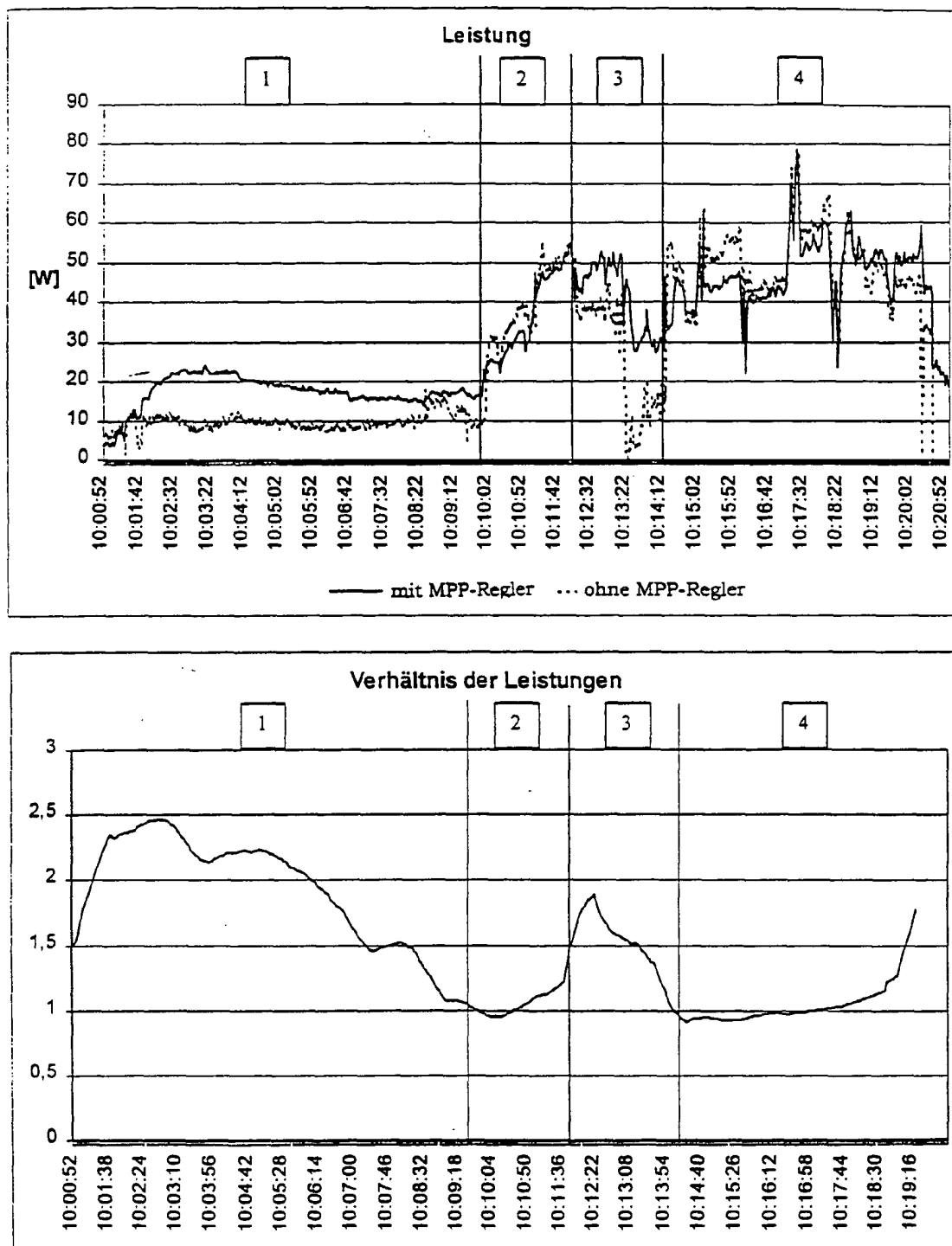


Fig. 11



Europäisches
Patentamt

EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung
EP 03 02 3546

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (Int.Cl.7)
A	FR 2 686 434 A (ALCATEL ESPACE) 23. Juli 1993 (1993-07-23) * das ganze Dokument *	1-35	G05F1/67

A	FR 2 819 653 A (CENTRE NAT RECH SCIENT) 19. Juli 2002 (2002-07-19) * das ganze Dokument *	1-35	

A	US 4 510 434 A (FLECKENSTEIN VOLKER ET AL) 9. April 1985 (1985-04-09) * Zusammenfassung *	1-35	

Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort DEN HAAG		Abschlußdatum der Recherche 28. Januar 2004	Prüfer Schobert, D
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : mündliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT
 ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 03 02 3546

In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentedokumente angegeben.

Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am
 Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

28-01-2004

Im Recherchenbericht angeführtes Patentedokument		Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie		Datum der Veröffentlichung
FR 2686434	A	23-07-1993	FR	2686434 A1	23-07-1993

FR 2819653	A	19-07-2002	FR	2819653 A1	19-07-2002
			CA	2434405 A1	18-07-2002
			EP	1354254 A1	22-10-2003
			WO	02056126 A1	18-07-2002
			NO	20033174 A	16-09-2003

US 4510434	A	09-04-1985	DE	3212022 A1	06-10-1983
			AT	31983 T	15-01-1988
			DE	3375336 D1	18-02-1988
			EP	0090212 A2	05-10-1983
			JP	58182726 A	25-10-1983

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82